

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**INTELIGIBILIDADE ACÚSTICA DE SALAS AVALIADA  
POR UM ÍNDICE SIMPLIFICADO DE  
TRANSMISSÃO DE FALA**

**DISSERTAÇÃO SUBMETIDA A UNIVERSIDADE FEDERAL  
DE SANTA CATARINA PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE  
MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**ELVIRA BARROS VIVEIROS DA SILVA**

**FLORIANÓPOLIS, MAIO DE 1989**

INTELIGIBILIDADE ACÚSTICA DE SALAS AVALIADA POR UM ÍNDICE  
SIMPLIFICADO DE TRANSMISSÃO DE FALA

ELVIRA BARROS VIVEIROS DA SILVA

ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE

M E S T R E E M E N G E N H A R I A

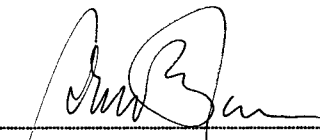
ESPECIALIDADE ENGENHARIA MECÂNICA ÁREA DE CONCENTRAÇÃO:

VIBRAÇÕES E ACÚSTICA E APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO

CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA



SAMIR NAGI YOUSRI GERGES, Ph.D-ORIENTADOR

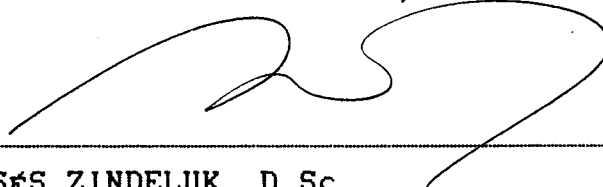


ARNO BLASS, Ph.D - COORDENADOR DO CURSO

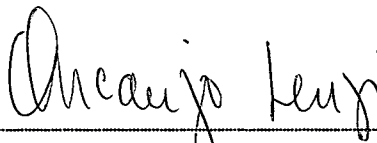
BANCA EXAMINADORA:



SAMIR NAGI YOUSRI GERGES, Ph.D-PRESIDENTE



MOYSÉS ZINDELUK, D.Sc.



ARCANJO LENZI, Ph.D.

pela realização dos dois sonhos,  
a você, Bobi.

## AGRADECIMENTOS

- Ao colega Arquiteto Carlos Eugênio Hime, pela apropriada indicação do local onde cursar o mestrado;

- Ao Professor Maliska, pela orientação de como deve proceder uma Arquiteta para conseguir ingressar no Mestrado da Engenharia Mecânica;

- Ao Professor Samir, pela acolhida carinhosa de amigo; por ter-me ensinado, como professor, tudo o que sei; por me orientar na dissertação, e, ainda, por todos os conselhos profissionais que me tem dado;

- Ao Professor Jordan, com quem desfrutei brilhantes conversas sobre Acústica; pela ajuda fundamental nas medições, intermináveis, durante os finais de semana;

- Ao amigo Eduardo Márcio, por me ensinar, em 10 minutos, sistema operacional + processador de texto + BASIC;

- A todo o pessoal do Laboratório, onde foi alegre trabalhar;

- Ao CNPq, que, cumprindo adequadamente sua finalidade, forneceu o apoio financeiro;

- A turma do Rio: Claudinha, Fernando & Marcinho, Maurício & Fernando e Luis. Longe de vocês foi tudo mais difícil;

- Aos "nativos", que tornaram tão gostosa minha chegada em Santa Catarina: Dado, Pimenta & Ciça, Silvana, e, claro, os de Brusque: Dodi, Chu, Galego, Guta, Roli e Cuco; em especial, à Clarice, amiga, irmã;

- Aos que, infelizmente, não estão presentes e me fazem muito falta: Tia Dudu, V8, Titia e Sampaio;

- A Mãe, ao Pai e ao Murilo, pela torcida.

## ÍNDICE

RESUMO.....	x
ABSTRACT.....	xi
SIMBOLOGIA.....	xii
1. <u>INTRODUÇÃO</u> .....	1
1.1 Definições utilizadas	
1.1.1 Relativas aos sinais empregados.....	4
1.1.2 Relativas aos métodos de qualificação de inteligibilidade.....	5
1.2 Revisão bibliográfica	
1.2.1 Origem do método.....	6
1.2.1.1 Função Transferência de Modulação / FTM.....	7
1.2.1.2 Índice de Transmissão de Fala / ITF.....	12
1.2.1.3 RASTI.....	14
1.2.2 Comparação a outros índices.....	15

1.3 Contribuição e conteúdo deste trabalho.....	20
---	----

## 2. FORMULAÇÃO ANALÍTICA DO MÉTODO

2.1 Metodologia da avaliação de inteligibilidade baseada no índice de Transmissão de Fala.....	22
2.2 Fundamentos matemáticos	
2.2.1 Escolha das frequências de áudio portadoras.....	24
2.2.2 Escolha das frequências de modulação.....	25

## 3. TÉCNICA DE MEDIÇÃO

3.1 Geração de sinal de teste	
3.1.1 Parâmetros adotados.....	46
3.1.2 Etapas da composição do sinal.....	48
3.2 Qualificação do sinal de teste e do sistema de medição.....	89
3.3 Análise do sinal de recepção	
3.3.1 Captação do sinal.....	90
3.3.2 Processamento digital.....	93
3.3.3 Processamento numérico.....	98

#### 4. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

##### 4.1 Testes de qualificação do método

4.1.1 Medição em campo aproximadamente livre.....100

4.1.2 Medição com ruído de fundo simulado.....102

4.1.3 Medição em câmara reverberante.....104

##### 4.2 Testes em sala de aula.....109

4.2.1 Sala de aula sem alterações.....114

4.2.2 Sala com alteração das  
características de absorção sonora.....116

4.2.3 Sala com alteração das  
condições de ruído de fundo.....119

4.2.4 Análise dos fatores redução de modulação.....121

#### 5. SUMÁRIO, CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

5.1 Sumário.....123

5.2 Conclusões e Recomendações.....124

APÊNDICE A - Fator Redução de Modulação.....129

APÊNDICE B - Programas para processamento de sinais no  
analisador digital:



. Cálculo de raiz quadrada de sinal no tempo.....	137
. Comparação entre respostas com e sem janela.....	138
. Captação do sinal resposta.....	139
 - Programa em linguagem BASIC para cálculo de IRIS.....	140
 REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA.....	142

## **RESUMO**

---

O objetivo deste estudo é apresentar a implantação de uma metodologia de avaliação de inteligibilidade acústica de salas através do processamento digital de sinais, incluindo indiretamente parâmetros subjetivos que influenciam a qualificação de um ambiente. A técnica adotada baseia-se no índice de Transmissão de Fala, derivação de um conceito ótico: a Função Transferência de Modulação. A composição do sinal de excitação que simula a fala humana e a análise do sinal de resposta do ambiente são apresentados. Entre outros aspectos, verificam-se os resultados às simulações de ruído de fundo e de reverberação comparativamente ao modelo teórico, e qualifica-se uma sala de aula sob diversas condições de ensaio.

## **ABSTRACT**

This study shows the implantation of an evaluation method for speech intelligibility through digital signal processing, including subjective parameters used to qualify a room. The technique is based on the Speech Transmission Index derived from the optical concept of Modulation Transfer Function. The excitation signal composition through which human speech is simulated and the room response signal are presented. The experimental results of reverberation and background noise simulations against theoretical model are shown, as also are the qualification of classroom under a variety of conditions test.

## SIMBOLOGIA

A	absorção total do ambiente..... [m <sup>2</sup> Sabins]
B	constante.....[adimensional]
c	velocidade de propagação da onda sonora no meio.....[m/s]
d	parte real da função do filtro no domínio da frequência.....[adimensional]
DC	sinal invariante no tempo.....[variável]
Fa	frequência de amostragem no analisador digital.....[Hz]
Fc	frequência central da banda de oitava.....[Hz]
f <sub>i</sub>	i-ésima frequência de modulação.....[Hz]
F <sub>j</sub>	j-ésima frequência de áudio portadora.....[Hz]
F <sub>max</sub>	frequência máxima.....[Hz]
f <sub>m</sub> , f	frequência de modulação.....[Hz]
i	unidade imaginária = $\sqrt{-1}$ .....[adimensional]
I	intensidade acústica de um sinal.....[W/m <sup>2</sup> ]
I <sub>o</sub>	intensidade acústica do sinal de teste.....[W/m <sup>2</sup> ]
I <sub>b</sub>	intensidade acústica instantânea do ruído branco na excitação, filtrado em banda de oitava.....[W/m <sup>2</sup> ]
I <sub>f</sub>	intensidade acústica do sinal de resposta.....[W/m <sup>2</sup> ]
I' <sub>f</sub>	intensidade acústica do sinal de resposta não normalizada.....[W/m <sup>2</sup> ]
I <sub>j</sub>	j-ésima intensidade acústica da excitação.....[W/m <sup>2</sup> ]

$I_p$	intensidade acústica instantânea do ruído branco na resposta.....[W/m <sup>2</sup> ]
$I'_p$	intensidade acústica instantânea do ruído branco na resposta, não normalizada.....[W/m <sup>2</sup> ]
IRIS	índice rápido de inteligibilidade de salas.....[adimensional]
$I_r$	intensidade acústica do ruído de fundo.....[W/m <sup>2</sup> ]
$l_n$	número inteiro.....[adimensional]
$l_n \Delta f$	n-ésima frequência de modulação.....[Hz]
$m$	fator redução de modulação.....[adimensional]
$m_0$	índice de modulação inicial.....[adimensional]
$m_f$	índice de modulação final.....[adimensional]
$m'_f$	índice de modulação final não normalizado.....[adimensional]
$P$	pressão sonora.....[N/m <sup>2</sup> ]
$P_0$	pressão sonora do sinal de teste.....[N/m <sup>2</sup> ]
$P_b$	pressão sonora instantânea do ruído branco filtrado em banda de oitava.....[N/m <sup>2</sup> ]
$P_r$	pressão sonora do ruído de fundo.....[N/m <sup>2</sup> ]
$R$	pressão sonora do ruído branco não filtrado.....[N/m <sup>2</sup> ]
$Re$	parte real da função de intensidade.....[W/m <sup>2</sup> ]
$r$	função resposta impulsiva quadrática.....[1/s]
$S$	função do filtro no domínio da frequência.....[adimensional]
$(S/R)$	razão sinal/ruído.....[dB]
$(S/R)_{ap}$	razão sinal/ruído aparente.....[dB]
$t, T$	tempo.....[s]
$t'$	tempo de atraso.....[s]

$T_r$	tempo de reverberação.....[s]
$\bar{T}_r$	tempo de reverberação médio.....[s]
$T_s$	período de um sinal.....[s]
$V$	volume.....[m <sup>3</sup> ]
$W$	potência sonora de uma fonte.....[W]
$x$	parte real da pressão sonora do ruído branco....[N/m <sup>2</sup> ]
$\bar{x}$	valor médio de IRIS.....[adimensional]
$y$	parte imaginária da pressão sonora do ruído branco.....[N/m <sup>2</sup> ]
$\Delta f$	resolução em frequência.....[Hz]
$\Delta NPS$	diferença de nível de pressão sonora.....[dB]
$\epsilon$	densidade de energia.....[J/m <sup>3</sup> ]
$\tau$	constante de tempo exponencial.....[s]
$\rho_0$	densidade do meio.....[kg/m <sup>3</sup> ]
$\sigma$	desvio padrão.....[variável]

## **CAPÍTULO 1**

### **INTRODUÇÃO**

Do ponto de vista da acústica, conforto ambiental é um conceito de caráter subjetivo, com vários parâmetros influenciando a conceituação de um espaço arquitetônico.

Como critério primeiro, há de ser levado em consideração o fim a que se destina o ambiente, pois os objetivos a serem alcançados podem diferir, às vezes, por completo. Em casos extremos estariam, por exemplo, um hospital e uma câmara reverberante, onde o que é indesejável para o primeiro, é fundamental para a existência do segundo.

Em projetos de salas, há de se distinguir ainda se sua utilização se dará para aulas, conferências ou música, pois existem propriedades da comunicação verbal que, quando focalizadas satisfatoriamente, podem não colaborar para a boa percepção de sons musicais.

Tendo por objetivo a palavra falada, o foco de interesse é a inteligibilidade, ou seja, a maior ou menor possibilidade de reconhecimento, pelo ouvinte, do que é proferido pelo orador. Há de se considerar também se o grau de compreensão está uniformemente distribuído por todos os lugares,

devendo-se evitar que haja posições de perfeita clareza em contraposição a lugares com inteligibilidade difusa.

O estudo da acústica de interiores, visando à otimização do resultado em termos de inteligibilidade, compreende os seguintes fatores importantes:

Geometria do espaço, pois a forma é fator determinante na intensidade das primeiras reflexões, que atuam diretamente na qualidade acústica final do ambiente. Adicionalmente, as ressonâncias acústicas devem estar bem distribuídas no espectro, atingindo-se homogeneidade de energia em frequência.

Nível de ruído de fundo, gerado pelo ruído urbano, pelo próprio ruído interno do local e por máquinas e equipamentos, tais como sistemas de climatização. Não deve mascarar o sinal de interesse, no caso, as palavras.

Tempo de reverberação, que é inversamente proporcional à absorção sonora introduzida no ambiente pelas superfícies de seus elementos componentes. O tempo excessivo gera a superposição do som ainda em reverberação com o som emitido imediatamente a seguir, provocando a não compreensão, ao final, das palavras pronunciadas. Com o tempo demasiadamente curto, as sílabas emitidas soam secas, dificultando sua necessária ligação, realizada pelo cérebro, para que se diferencie o produto final, a palavra.



Sistema de amplificação sonora, se existente, deve estar projetado adequadamente, não devendo ocorrer infra ou superdimensionamento, e com comportamento linear plano na frequência.

Na análise de ambiente destinado a conferências, no entanto, além dos aspectos já indicados, outros fatores devem ser considerados, dentre os quais:

- potência sonora da(s) fonte(s),
- resposta em frequência da sala e sistemas eletro-acústicos utilizados, respostas de fase e respostas impulsivas,
- distorções transientes,
- modulações,
- razão energia inicial/final,
- intermodulações,
- tempo de atraso,
- fala-cruzada ("cross-talk"),
- distribuição temporal de energia.

Considerando a quantidade de parâmetros envolvidos na avaliação acústica de salas, métodos experimentais que tragam no bojo de seus resultados todas estas contribuições têm merecido maior ênfase ao ser analisada a qualificação de inteligibilidade de ambientes.

Uma metodologia de análise que vem desenvolvendo-se

atualmente é baseada em um conceito amplamente utilizado em ótica. Ante a analogia existente entre luz e som, HOUTGAST e STEENEKEN introduziram no estudo da acústica de salas - visando à inteligibilidade - a Função Transferência de Modulação, FTM ("Modulation Transfer Function") [1].

Fundamentado neste conceito, o presente estudo demonstrará uma técnica de qualificação de inteligibilidade de salas através do processamento digital de sinais.

## 1.1 DEFINIÇÕES UTILIZADAS

Serão apresentadas a seguir algumas definições empregadas neste trabalho.

### 1.1.1 Relativas aos sinais empregados

A) Sinal de amplitude harmonicamente modulada - sinal no domínio do tempo, com variação de amplitude descrita matematicamente por função harmônica. Neste trabalho, o sinal de intensidade de ruído de espectro em banda larga (ruído branco) agirá como sinal portador, tendo sua amplitude modulada por somatório de funções senoidais.

B) Envelope de intensidade - função que envolve a variação de amplitude da intensidade no domínio do tempo.

C) Espectro envelope - resultado da análise espectral do envelope de intensidade, ou seja, sua transformada de Fourier.

#### 1.1.2 Relativas aos métodos de qualificação de inteligibilidade

A) Perda de Articulação de consoantes / PAcons ("Articulation Loss of Consonant"). Teste de qualificação de inteligibilidade de ambientes aplicado a um grupo de pessoas. A resposta é dada na forma de percentual médio das consoantes incorretamente compreendidas, das sílabas foneticamente balanceadas, desprovidas de significado, pronunciadas em pequenas frases portadoras.

B) Índice de Articulação / IA ("Articulation Index"). Procedimento criado por FRENCH e STEINBERG e normatizado pela ANSI [2]. A partir de medições experimentais em sistemas de comunicações ou em ambientes, calculam-se valores que simbolizam os resultados esperados como resposta a testes subjetivos. Neste método consideram-se alguns parâmetros básicos, tais como o espectro da fala e o espectro do ruído de fundo.

C) Índice de Palavra Foneticamente Balanceada/IPFB ("Phonetically Balanced word-score"). Como PAcons, compõe-se de listas de palavras monossilábicas a serem pronunciadas na aplicação do teste. Cada lista consiste em 50 palavras selecionadas, que contenham a mesma proporção dos sons

fundamentais encontrada na fala diária [3].

## 1.2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Por ser o tema abordado nesta dissertação o prosseguimento de uma linha de pesquisa bem definida, apresenta-se aqui uma revisão bibliográfica, para melhor compreensão do seu processo evolutivo.

### 1.2.1 Origem do método

Em 1973, T.HOUTGAST e H.J.M. STEENEKEN [1] introduzem novo parâmetro no estudo da acústica de salas, diretamente relacionado à inteligibilidade: a Função Transferência de Modulação - FTM ("Modulation Transfer Function").

Largamente utilizado na qualificação de sistemas óticos, o conceito baseia-se na quantificação da deterioração introduzida em um sinal pelo caminho de transmissão.

Utilizando-se um sinal de intensidade modulada harmonicamente, o efeito do caminho de transmissão no ambiente torna-se mensurável: é somente no envelope de intensidade que a reverberação e o ruído de fundo irão afetar o grau de modulação sem afetar sua forma senoidal.

Segundo os autores [1], o método não traz nenhuma informação adicional sobre o caminho de transmissão além das conhecidas nos outros métodos tradicionais. Apresenta, no entanto, duas razões pelas quais a FTM merece destaque. Primeiro, esta inclui, além da influência da reverberação e dos ecos distintos, também o ruído de interferência. E, em segundo lugar, a FTM possibilita um procedimento direto para obtenção de índice único, que quantifica o efeito do caminho de transmissão na inteligibilidade.

#### 1.2.1.1 Função Transferência de Modulação / FTM

Em uma sala, o som produzido pelo orador poderá chegar até o ouvinte através de diversos caminhos de transmissão sonora.

Quando se objetiva obter a função transferência de modulação, a análise desse caminho é formulada na relação existente entre o envelope do sinal de excitação (entrada) e o envelope do sinal de resposta (saída), constituindo o ambiente o sistema de transmissão, no caso, de envelopes de intensidade. A figura 1.1. ilustra o processo de deterioração do sinal de intensidade modulada ao atravessar um ambiente que possui reverberação e ruído de fundo.

A proposta apresentada por HOUTGAST e STEENEKEN [1] é quantificada na curva de atenuação em frequência, no caso a

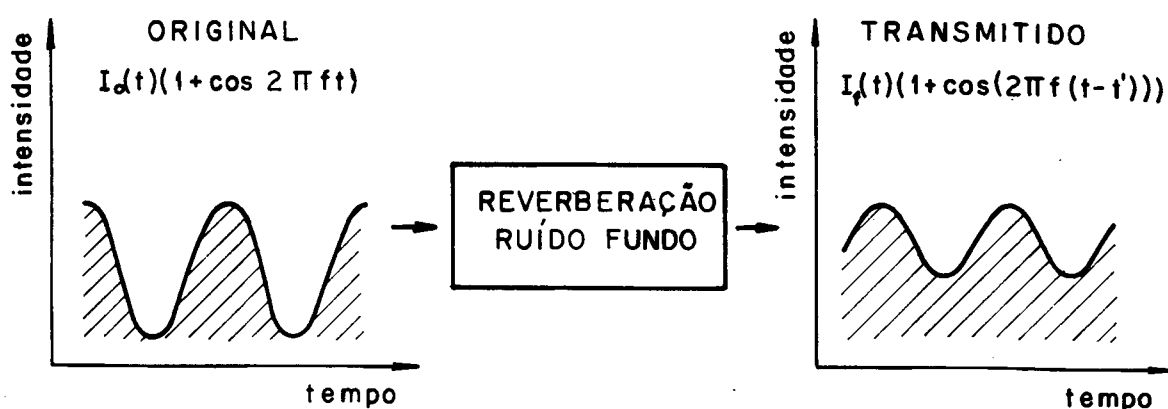


Figura 1.1 - Ilustração do processo de deterioração de um envelope de intensidade quando, ao passar por um sistema de transmissão, sofre a ação de reverberação e de ruído de fundo.

Função Transferência de Modulação do sistema sob análise, que é obtida através da relação dos espectros dos sinais de entrada e de saída, chamados Espectros Envelope.

A figura 1.2 mostra o envelope de intensidade acústica da fala original e quando deteriorado em virtude de reverberação, caso a, e de ruído de fundo, caso b. O espectro envelope reflete a distribuição espectral das modulações do envelope relativas à intensidade média, ou seja, o índice de modulação em função da frequência de modulação. A diferença entre o espectro envelope original e o resultante reflete a redução na modulação ocorrida pela influência do meio, apresentada na função transferência de modulação.

Os autores afirmam que a "análise de Fourier" somente

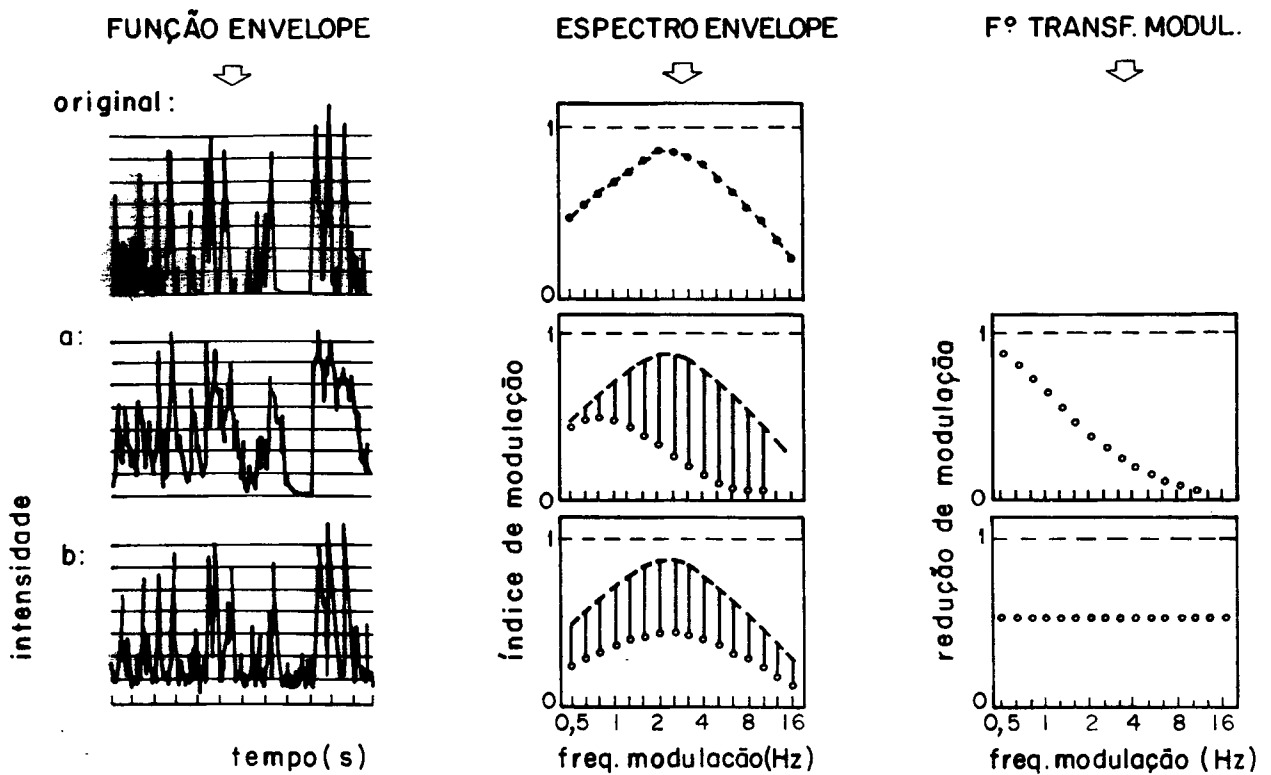


Figura 1.2 - A redução da modulação no envelope de saída relativa ao sinal original, fruto da reverberação (a) ou do ruído de fundo (b), pode ser expressa pela função transferência de modulação, que apresenta características distintas para cada interferência [4].

é possível porque, relativamente à intensidade, o ambiente comporta-se como sistema linear. No capítulo 2 será demonstrado que uma das condições básicas da linearidade, a aditividade, só é satisfeita quando a função envelope representa a intensidade do sinal.

Propõem, então, que o efeito do caminho de transmissão seja estudado aplicando-se, como excitação (entrada), um sinal de envelope simples e bem definido. Portanto, para a função quadrática do sinal de excitação, adotam um envelope

harmonicamente modulado, satisfazendo tais condições.

Considerando que a FTM qualifica o ambiente como um sistema de transmissão de envelopes, este independe do sinal de entrada, importando somente a relação existente entre excitação e resposta.

Objetivando aplicar o conceito de FTM à transmissão da fala humana, os autores analisam o comportamento desta, a qual, afirmam, tem um espectro envelope de perfil estável, razoavelmente independente da banda de oitava considerada o do orador [5], como será mostrado no capítulo 2 deste trabalho.

Mediante a análise de amostras de fala humana, prosseguem o estudo determinando as frequências de modulação normalmente nela encontradas. Afirmando apenas que, por várias razões, o sinal portador deve ser de banda larga [6], os autores definem, então, que o sinal de excitação também deve ser deste tipo (banda larga), modulado pela composição de funções harmônicas relativas às frequências de modulação detectadas.

Determinam que a análise do sinal recepcionado será feita em bandas de oitava, já que a reverberação e os demais efeitos de trajetória são normalmente funções da frequência.

O resultado de tal tipo de análise, a detecção da redução da amplitude de modulação em função da frequência de modulação, constitui-se na função transferência de modulação.



Em estudo posterior [5], HOUTGAST e STEENEKEN expõem a determinação matemática da FTM, dada a curva de reverberação e a razão sinal/ruído de um ambiente. Considerando a resposta livre da sala como puramente exponencial, caracterizada pelo tempo de reverberação, apresentam também a equação que rege a redução da modulação por frequência de modulação, mostrando que esta função possui característica de filtro passa-baixo.

A seguir demonstram o procedimento matemático para a obtenção um índice único, derivado a partir do conjunto de curvas da FTM apresentadas na figura 1.3, chamado índice de Transmissão de Fala / ITF ("Speech Transmission Index").

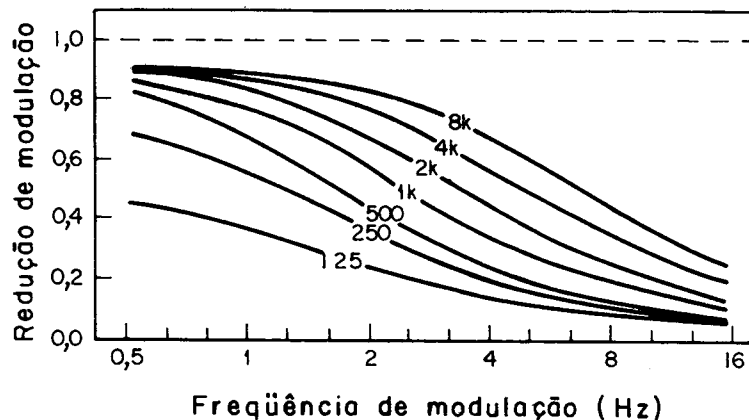


Figura 1.3 - Família de curvas de FTM, derivadas matematicamente para cada banda de frequência quando considerados diversos tempos de reverberação e níveis de ruído fundo [4].

### 1.2.1.2 Índice de Transmissão de Fala / ITF

A criação de tal metodologia, que possibilita a conversão dos noventa e oito valores que compõem a função transferência de modulação (14 frequências de modulação, que são as frequências centrais das bandas de 1/3 de oitava de 0,63 Hz a 12,5 Hz, analisadas em cada uma das 7 bandas de oitava, com frequências centrais de 125 Hz a 8 kHz) em um só valor, surgiu da necessidade de exprimir-se a qualidade acústica de uma sala, sob o ponto de vista da inteligibilidade, através de índice único. Dessa forma, a comparação entre salas, e mesmo o monitoramento da variação de parâmetros de um projeto, tornam-se mais acessíveis a avaliação.

O processo de obtenção desse índice único envolve cinco etapas básicas, compostas de operações matemáticas de simples execução [5,6,7].

Dado que a FTM pode ser obtida analiticamente a partir das características acústicas e geométricas da sala, e que o ITF é derivado da FTM, HOUTCAST e STEENEKEN concluem [5] que o índice também é possível de ser obtido conhecidas aquelas características, calculando-se, portanto, o ITF diretamente a partir de parâmetros de projeto.

Na mesma publicação [5] são apresentados, então, o cálculo de ITF pelo método estatístico de acústica de salas e pelo método de acústica geométrica (raios sonoros).

Em outro trabalho [6], STEENEKEN e NOUTGAST exibem os diferentes procedimentos matemáticos de cálculo de ITF quando considerados tipos distintos de perturbações na transmissão sonora, tais como: distorções no domínio da frequência, no domínio do tempo e distorções não lineares, como também a utilização de ITF no estudo de canais eletrônicos de transmissão digital de fala.

NOUTGAST, STEENEKEN e PLOMP mostram, em outro estudo [7], o desenvolvimento matemático para a obtenção do fator redução de modulação - parâmetro básico para cálculo de FTM e ITF - através da determinação da função resposta quadrática impulsiva, do tempo de reverberação e da razão sinal/ruído de um sistema. No apêndice A deste trabalho, o desenvolvimento matemático é detalhadamente apresentado. Demonstram os autores, também, a derivação matemática do fator redução de modulação quando conhecidos parâmetros de projeto, tais como: volume da sala, tempo de reverberação, nível de ruído de fundo na posição do ouvinte e nível da fala do orador a uma distância determinada.

Afirmam, ainda, no estudo [7], que tal metodologia incorpora uma variedade de regras empíricas da acústica de salas, tendo como base a acústica estatística.

Posteriormente, RIETSCHOTE e HOUTGAST [8] comparam as estimativas feitas pelo método da acústica estatística e pelo da acústica geométrica, concluindo ser o último mais sensível a alterações que visam a enriquecer a inteligibilidade de salas.

### 1.2.1.3 RASTI

A evolução da metodologia de cálculo do ITF resultou no surgimento da técnica de RASTI ("Rapid STI") [4]. Com os mesmos fundamentos do método original, porém restringindo a avaliação a menor número de bandas de frequências e dispensando a ponderação aplicada, nas bandas de frequências portadoras, para o cálculo do ITF, a técnica de RASTI agiliza a obtenção de resultados.

Criada por STEENEKEN e HOUTGAST [9], sua normatização encontra-se em fase de elaboração pela Comissão Internacional de Eletroacústica [10], com estudos de sua aplicabilidade desenvolvidos concomitantemente.

A viabilidade da utilização do método para diversos idiomas foi demonstrada por HOUTGAST e STEENEKEN [9], tendo a relação entre RASTI e testes subjetivos de inteligibilidade sido investigada extensivamente.

Um estudo, utilizando o equipamento de medição do RASTI fabricado pela Brüel & Kjaer [11], realizado por PER V. BRÜEL [12], apresenta as limitações desta técnica quando comparada ao ITF. São também apresentados resultados experimentais quando da utilização daquele equipamento.

A tabela 1.1 apresenta um resumo das principais características de cada método exposto, a título de comparação.

TABELA 1.1 - Quadro comparativo entre os diversos métodos

CARACTERÍSTICAS	FTM	ITF	RASTI
nº bandas de 1/1 oitava portadoras	7	7	2
nº de frequências moduladoras (total)	98	98	7
ponderação diferenciada, no cálculo da redução de modul p/ freq. portadora	sim	sim	não
resposta do método	7 curvas	índice	índice

### 1.2.2 Comparação a outros índices

A metodologia de qualificação de inteligibilidade, baseada na FTM e no ITF, é dita objetiva, visto que não inclui diretamente nenhum fator humano. Um dos modos de verificação de sua representatividade é a comparação de seus resultados aos de testes de compreensão de fala, estes subjetivos por serem diretamente aplicados a pessoas.

Dentre os testes subjetivos, é largamente empregado o de "Perda de Articulação de Consoantes, PAcons". HOUTGAST, STEENEKEN e PLOMP realizam, em trabalho publicado [7], a comparação entre ITF e PAcons. A figura 1.4 mostra a existência de uma relação linear entre os índices, apesar de não mencionado o desvio padrão entre a reta que melhor descreve a relação e os valores encontrados.

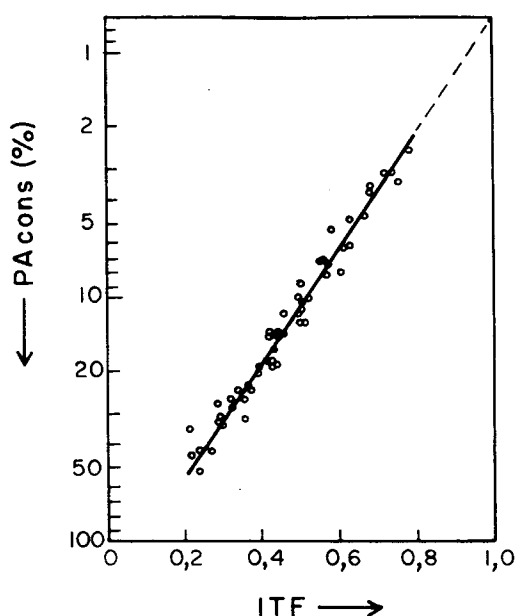
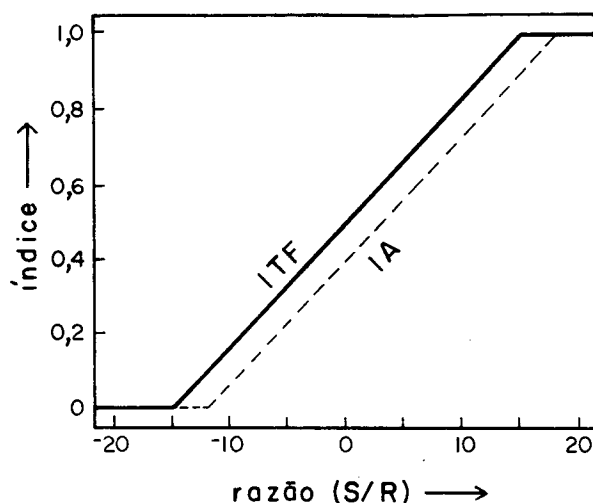


Figura 1.4 - Relação entre ITF e PAcons obtido para um conjunto de 57 condições que incluem diversas combinações de ruído de fundo e de reverberação [7].

Na mesma publicação [7], os autores demonstram o comportamento dos valores do ITF e do índice de Articulação, IA, quando o sistema sob análise sofre somente ruído de interferência. Para ambos os índices o comportamento foi o mesmo, linear, com o mesmo coeficiente angular regendo as funções respostas. A única diferença existente é o afastamento de 3 dB entre as retas, em relação à faixa de razão sinal/ruído sobre a qual o índice varia de zero a um, conforme apresenta a figura 1.5.



**Figura 1.5 - Relação entre ITF e IA supondo-se (S/R) invariante para as frequências de áudio como única interferência [7].**

Utilizando metodologia mais complexa de cálculo do ITF, STEENEKEN e HOUTGAST [6] apresentam o cálculo do índice quando considerado o efeito de mascaramento auditivo. A relação entre ITF e índice de Palavra Foneticamente Balanceada IPFB, quando os parâmetros de ponderação deste efeito são considerados, é apresentada sob duas formas distintas: a primeira, quando os parâmetros são obtidos de acordo com o procedimento para cálculo do IA, e a outra, quando são ajustados para uma correlação ótima entre os dois índices. Os desvios padrão encontrados para as curvas que melhor descrevem os resultados achados foram de 11,4 % e 5,2 %, respectivamente. Outras relações entre ITF e IPFB, para diversos tipos de deterioração de sinais, são também apresentadas naquele trabalho [6]. STEENEKEN e HOUTGAST concluem que o índice resultante, ITF, correlaciona-se bem com os testes subjetivos de inteligibilidade.

BRUEL [12] apresenta a relação entre ITF e IPFB para 167 condições distintas de medições, incluindo ruído, reverberação e outras formas de perturbações, mostrada na figura 1.6.

Em avaliação experimental, STEENEKEN e HOUTGAST [13] estudaram diferentes ambientes: teatro, auditório e igreja, onde o método de ITF foi utilizado para qualificação da inteligibilidade, como também para predizer outros parâmetros acústicos.

No primeiro caso, no teatro, foi estudada a variação do índice, com e sem a presença de ruído de fundo simulado matematicamente, em função da distância do ponto de excitação. O possibilitar o mapeamento qualitativo do ambiente, como também por oferecer informações importantes sobre tempo de reverberação, razão sinal/ruído e existência de ecos.

No auditório, foi analisado o efeito introduzido pelo sistema de amplificação sonora elétrica na inteligibilidade. Concluiu-se que este efeito é função do nível do ruído de fundo.

Na terceira aplicação do método, realizada em uma igreja, a qualidade da inteligibilidade era muito baixa pela total inexistência de superfícies absorventes no ambiente. Os resultados apresentados demonstraram que a introdução de sistema de amplificação sonora fez com que os valores de ITF decrescessem, como também que a introdução de material de



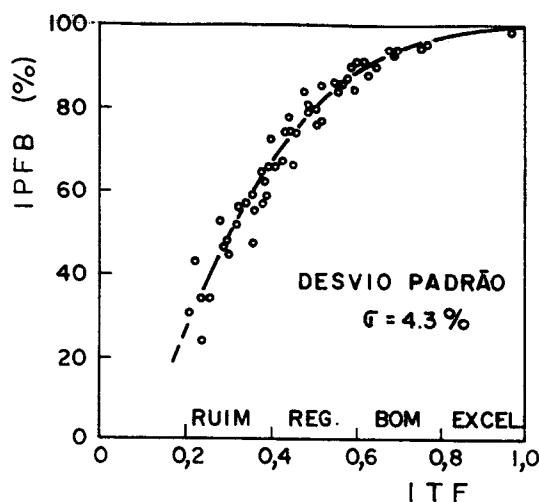


Figura 1.6 - Relação entre ITF e IPFB para 167 condições de transmissão sonora [12].

absorção distribuído pelos assentos e na parede de fundo fez desta a melhor condição de teste (sem sistema de amplificação sonora).

Nessa linha de investigação, STEENEKEN e HOUTGAST [4] fazem um estudo onde, após medida a função transferência de modulação de um ambiente, são estimados os valores do tempo de reverberação e da razão sinal/ruído que melhor descrevem a família de curvas da FTM obtida. Com estes parâmetros determinados, calculam os valores teóricos das curvas da FTM através da equação matemática de  $m(f)$ , concluindo que é muito pequena a diferença encontrada entre os valores originais e os estimados.

Prosseguem afirmando que o tempo de reverberação estimado parece ser definido muito mais pelo Tempo de Decaimento Inicial, TDI ("Early Decay Time"), que pelo Tempo de

Reverberação, tradicionalmente adotado. Embasando tal afirmação, três curvas de reverberação distintas, porém com o mesmo valor de TDI, são apresentadas. Tanto para testes subjetivos de compreensão de palavras, como para funções transferência de modulação, os resultados foram os mesmos. Concluem, portanto, afirmando que TDI apresenta maior coerência, que o tempo de reverberação convencionalmente adotado, com resultados de qualificação de inteligibilidade.

### 1.3 CONTRIBUIÇÃO E CONTEÚDO DESTE TRABALHO

As principais contribuições do presente trabalho são:

- implantar, com adaptações necessárias ao sistema digital, uma metodologia de avaliação da inteligibilidade de ambientes, conquistando rapidez na realização dos testes e no processamento das respostas.
- apresentar as limitações existentes na associação do ITF, no qual se baseia o método estudado, com interpretações subjetivas do mesmo índice.
- reforçar a idéia de que a geometria espacial dos ambientes é parâmetro relevante na qualificação da inteligibilidade acústica, junto com o tempo de reverberação e o nível de ruído de fundo.

No capítulo 2 são apresentadas as peculiaridades da fala humana e a forma pela qual o sinal de excitação do teste simula aquelas características.

No capítulo 3, são demonstrados os procedimentos para elaboração do sinal de teste, como também a qualificação destes sinais e da cadeia de medição. É apresentada a aquisição do sinal de resposta, seu processamento digital e posterior obtenção matemática do índice final.

O capítulo 4 apresenta os dados obtidos nos ensaios de qualificação do método e também os resultados do teste em aplicação prática sob diversas condições.

No capítulo 5, é apresentado, de forma sucinta, o trabalho desenvolvido, com conclusões e recomendações para pesquisas posteriores.

## **CAPÍTULO 2**

### **FORMULAÇÃO ANALÍTICA DO MÉTODO**

Este capítulo contém o procedimento do método de avaliação de inteligibilidade e sua formulação matemática.

#### **2.1 METODOLOGIA DA AVALIAÇÃO DE INTELIGIBILIDADE BASEADA NO ÍNDICE DE TRANSMISSÃO DE FALA**

A fala humana compõe-se de um fluxo de energia sonora, com distribuição de intensidade bem específica, tanto no domínio do tempo quanto no da frequência. Esta característica peculiar da fala corresponde às flutuações determinadas pelas modulações de amplitude da intensidade. A figura 2.1a apresenta o envelope de intensidade acústica de uma amostra típica de fala quando filtrada na banda de oitava, com frequência central de 1 kHz. As modulações serão quantificadas através de análise espectral digital do envelope de intensidade. A figura 2.1b as apresenta já normalizadas com respeito ao valor médio da intensidade.

A metodologia de avaliação de inteligibilidade acústica de salas apresentada neste estudo compreende duas etapas fundamentais: a elaboração de um sinal de teste modulado,

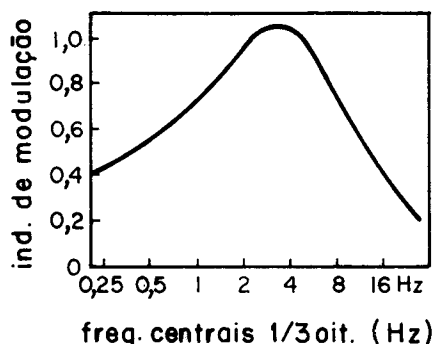
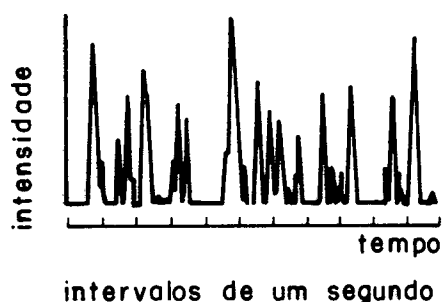


Figura 2.1a - Exemplo do envelope de intensidade de uma amostra de fala [5].

Figura 2.1b - Curva mostrando o espectro de modulação da fala [5].

com o qual o ambiente sob análise será excitado, e, através de processamento digital específico, a aquisição das amplitudes de modulação do sinal de resposta da sala. Os valores, quando comparados com a modulação do sinal de teste, serão convertidos em "fatores redução de modulação", que, após determinado cálculo, levam à obtenção de um índice. A este índice resultante, que toma valores de zero a um, foi dado o nome de "Índice Rápido de Inteligibilidade de Salas / IRIS", por diferenciar-se, quanto à composição do sinal de teste, do índice de Transmissão de Fala / ITF e de outros métodos nele baseados (ver item 1.2.1, capítulo 1).

O sinal de teste, decorrente da função temporal de intensidade desejada, encontra correlação com a fala em dois aspectos principais: nas bandas de áudio que serão utilizadas e na simulação das flutuações através das frequências que modularão o sinal.

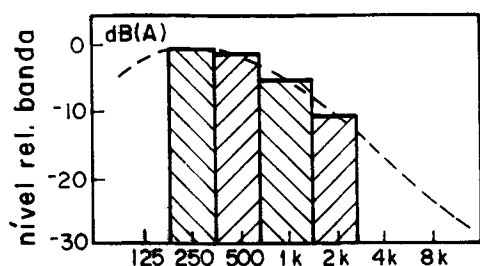
Durante a excitação acústica da sala, os sinais serão captados em pontos diversos, obtendo-se sinais de respostas que, submetidos à conversão analógica/digital, processados e manipulados matematicamente, levam a resposta do ambiente à avaliação de inteligibilidade, traduzida em um índice.

## 2.2 FUNDAMENTOS MATEMATICOS

### 2.2.1 Escolha das frequências de áudio portadoras

Considerando-se a faixa do espectro em que normalmente se situa a fala humana, e considerando-se, ainda, as bandas de frequência mais determinantes na qualidade da inteligibilidade, conforme demonstra a figura 2.2, o sinal de teste compreende quatro bandas de oitava, com frequências centrais de 250 Hz, 500 Hz, 1000 Hz e 2000 Hz.

Garante-se, desta forma, que as componentes mais frequentes da fala estão representadas, como também estão as que condicionam, em maior grau, a compreensão das palavras proferidas.



frequências centrais da banda de 1/1 oitava (Hz)

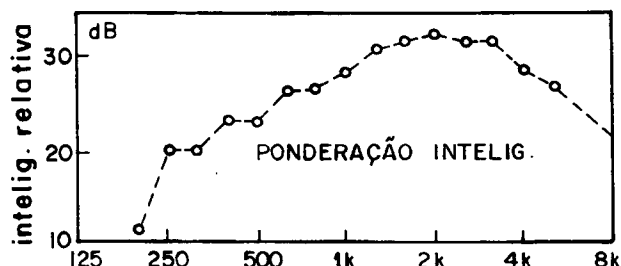


Figura 2.2a - Espectro típico da fala quando integrado sobre longo intervalo de tempo [4].

Figura 2.2b - Curva de composição das frequências da fala avaliando-se as contribuições na inteligibilidade [14].

### 2.2.2 Escolha das frequências de modulação

Apesar das variações de entonação, dicção e altura de voz entre oradores, e mesmo distinguindo-se homens e mulheres, o que implica alteração da banda de áudio portadora, as frequências moduladoras existentes na fala estão sempre na mesma região do espectro, com frequências entre 0,63 Hz e 12,5 Hz fortemente presentes. A figura 2.3a apresenta curvas de espectros envelope relativos a formas distintas de oração, tais como normal, enfática, e sussurrada, do mesmo texto, proferido pela mesma pessoa, demonstrando comportamento estável.

Ainda em relação às flutuações existentes na fala, estudos demonstram que o espectro envelope desse tipo de sinal, onde os componentes responsáveis pelas flutuações são detectados em amplitude e frequência, é também relativamente independente da banda de frequência portadora das modulações [15]. A figura

2.3b representa o espectro envelope médio de um mesmo fragmento de texto, de 60 segundos de duração, falado por 10 oradores do sexo masculino. Observar-se que, mesmo variando-se a banda de oitava analisada, as curvas apresentam a mesma tendência, com amplitude máxima em torno de 3 Hz. A reprodutibilidade das curvas, expressa pelo desvio-padrão, é em torno de 1,5 dB.

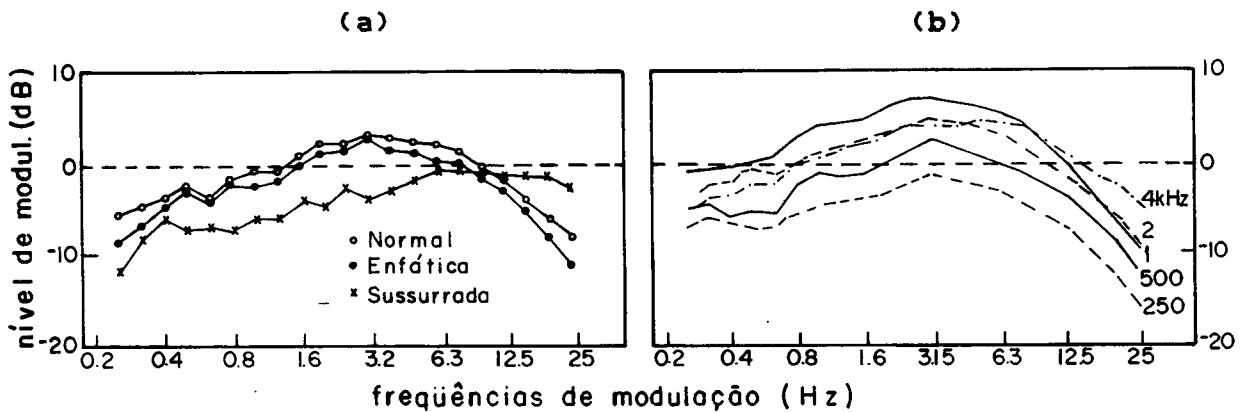


Figura 2.3a - Espectro envelope para banda de oitava com frequência central de 2000 Hz, de três segmentos, com mesmo texto discursados pelo mesmo orador [15].

Figura 2.3b - Espectro envelope de amostras de 60 segundos de 10 oradores, falando o mesmo texto, para bandas de oitavas centradas em 250 Hz até 4 kHz [15].

Em análise mais completa de um sistema de transmissão de modulação, consideram-se 14 frequências de modulação para cada uma das 7 bandas de oitava, de 125 Hz até 8 kHz, resultando em 98 valores de fatores redução de modulação a serem computados. Para o método ora proposto, as baixas frequências de modulação serão simuladas no sinal de teste através de 15 frequências discretas, entre 1,0 Hz e 12,5 Hz, distribuídas



pelas 4 bandas de oitava adotadas. Reportando-se à tabela 1.1, apresentada no capítulo 1, pode-se comparar os parâmetros utilizados neste estudo com os dos métodos originários desta linha de pesquisa. A tabela 2.1 apresenta as frequências de modulação adotadas e a figura 2.4 apresenta sua distribuição ao longo da curva do espectro envelope tradicional da fala. Levando-se em consideração a viabilidade oferecida pelo HP 5451C, procurou-se, com o conjunto de frequências de modulação escolhido, representar a curva com boa precisão.

**TABELA 2.1 - Frequências moduladoras adotadas**

FREQ. MODUL. [ Hz] ( = $F_c$ 1/3 OIT)	BANDAS DE FREQUÊNCIA PORTADORAS [Hz]			
	250	500	1 k	2 k
1,00		x		
1,25			x	
1,60	x			
2,00		x		
2,50			x	x
3,15	x			
4,00		x		
5,00			x	x
6,30	x			
8,00		x		
10,0			x	x
12,5	x			

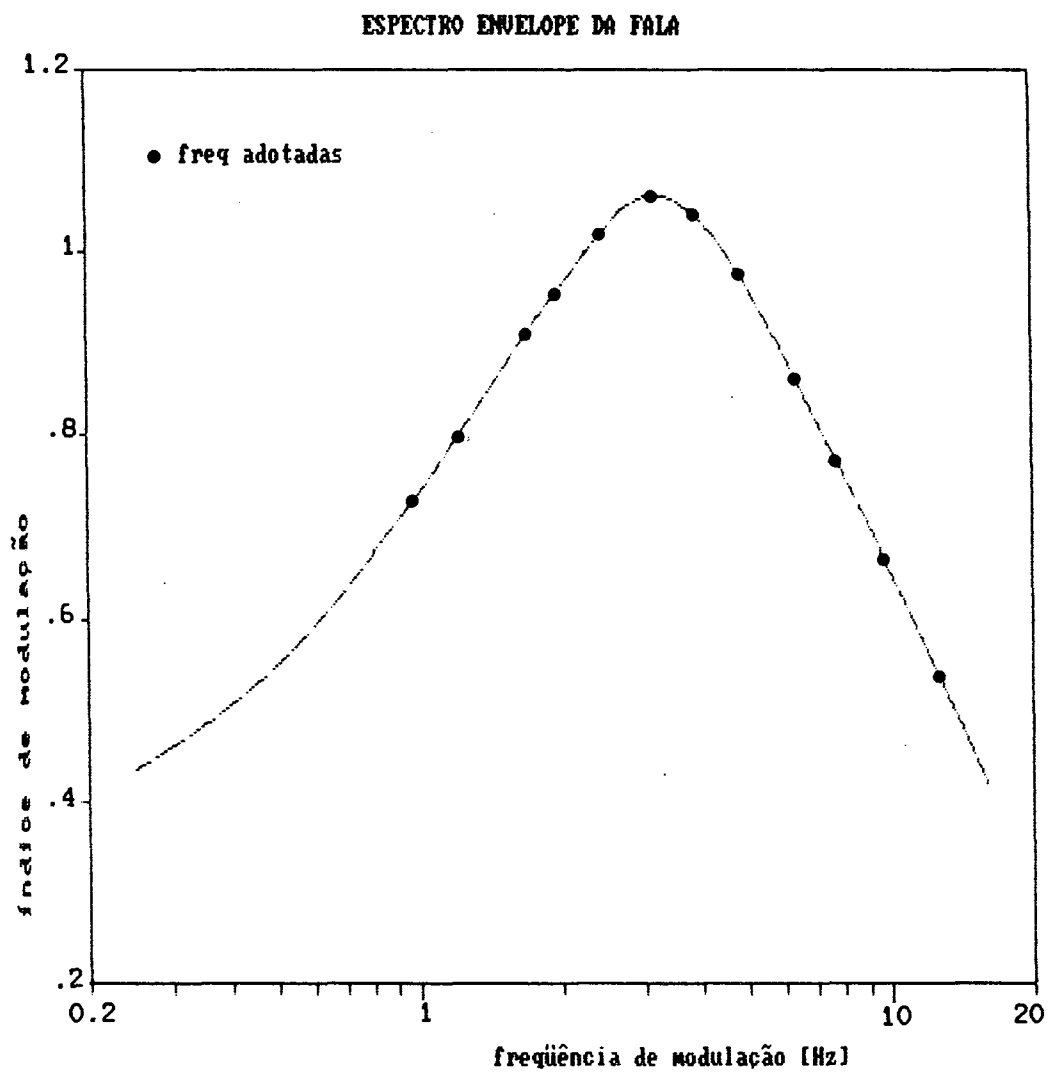


Figura 2.4 - Espectro envelope tradicional da fala [5], assinaladas as frequências de modulação adotadas.

Para a formulação das funções de intensidade desejadas na metodologia aplicada neste estudo, algumas considerações, que produzem sinais específicos, precisam ser feitas.

Em primeiro lugar, desde que o envelope de intensidade não pode apresentar valores abaixo de zero, serão empregadas amplitudes iniciais de modulação nos valores de 0,31, 0,40, 0,40 e 0,448, doravante chamadas de índices de modulação inicial,  $m_0$ , para as bandas de oitava portadoras com frequências centrais de 250 Hz, 500 Hz, 1 kHz e 2 kHz, respectivamente. Tais valores são escolhidos de sorte que as funções moduladoras, ou seja, os elementos entre colchetes das expressões 2.1, 2.2, 2.3 e 2.4, nunca tomem valores negativos.

Ao sinal será acrescido também um valor DC, que será utilizado no processo de normalização da função resposta, conforme será demonstrado ainda neste capítulo.

As expressões matemáticas de cada banda de oitava portadora, demonstrando o comportamento da intensidade sonora do sinal de teste  $I_0(t)$ , podem então ser descritas por:

A) Banda de oitava portadora com  $F_c = 250$  Hz e  
 $f_i = 1,6$  Hz, 3,15 Hz, 6,30 Hz, 12,5 Hz:

$$I_0(t) = I_b(t) \{ 1 + 0,31 [ \text{sen}(2\pi f_1 t) + \text{sen}(2\pi f_2 t) + \text{sen}(2\pi f_3 t) + \text{sen}(2\pi f_4 t) ] \} \quad (2.1)$$

B) Banda de oitava portadora com  $F_c = 500$  Hz e  
 $f_i = 1,0$  Hz,  $2,0$  Hz,  $4,0$  Hz,  $8,0$  Hz:

$$I_o(t) = I_b(t) \{ 1 + 0,40 [ \text{sen}(2\pi f_1 t) + \text{sen}(2\pi f_2 t) \\ + \text{sen}(2\pi f_3 t) + \text{sen}(2\pi f_4 t) ] \} \quad (2.2)$$

C) Banda de oitava portadora com  $F_c = 1000$  Hz e  
 $f_i = 1,25$  Hz,  $2,5$  Hz,  $5,0$  Hz,  $10,0$  Hz:

$$I_o(t) = I_b(t) \{ 1 + 0,40 [ \text{sen}(2\pi f_1 t) + \text{sen}(2\pi f_2 t) \\ + \text{sen}(2\pi f_3 t) + \text{sen}(2\pi f_4 t) ] \} \quad (2.3)$$

D) Banda de oitava portadora com  $F_c = 2000$  Hz e  
 $f_i = 2,5$  Hz,  $5,0$  Hz,  $10,0$  Hz:

$$I_o(t) = I_b(t) \{ 1 + 0,448 [ \text{sen}(2\pi f_1 t) + \text{sen}(2\pi f_2 t) \\ + \text{sen}(2\pi f_3 t) ] \} \quad (2.4)$$

onde,

$I_b$  = intensidade acústica instantânea do ruído branco  
 filtrado em banda de oitava

$f_i$  = i-ésima frequência de modulação

Em termos genéricos, as 4 bandas de sinais de teste  
 podem ter suas funções de intensidade,  $I_o(t)$ , expressas por:

$$I_0(t) = I_b(t) \left\{ 1 + m_0 \left[ \sum_{n=1}^4 sen(2\pi l_n \Delta f t) \right] \right\} \tag{2.5}$$

onde,

- $m_0$  = índice de modulação inicial
- $\Delta f$  = resolução em frequência
- $l_n \Delta f$  = n-ésima frequência de modulação
- $l_n$  = número inteiro, que varia conforme apresentado na tabela 2.2.

TABELA 2.2 - Valores de  $l_n$  por banda de frequência portadora

Fc [Hz]	$l_1$	$l_2$	$l_3$	$l_4$
250	7	13	26	52
500	2	4	8	16
1 k	1	2	4	8
2 k	1	2	4	0

Na verdade, o sinal de excitação é a raiz quadrada de cada uma das expressões 2.1 a 2.4, pois temos que [16]:

$$I(t) = \frac{P^2(t)}{2 \rho_0 c} \tag{2.6}$$

logo,

$$P^2(t) \propto I(t) \tag{2.7}$$

onde,

$I(t)$  = intensidade acústica de um sinal

$P(t)$  = pressão sonora de um sinal

$\rho_0$  = densidade do meio

$c$  = velocidade do som no meio

Na detecção da função intensidade da resposta considera-se que, conforme mencionado no capítulo 1 deste trabalho, um sinal de intensidade modulada, ao sofrer reverberação e ruído de interferência, ou seja, ruído de fundo, trará, como resultado, algum decréscimo no índice de modulação e certo tempo de atraso, sem perder, no entanto, sua forma harmônica.

Para o sinal de intensidade da resposta,  $I_f(t)$ , tem-se portanto:

$$I_f(t) = I_p(t) \left\{ B + \left[ \sum_{n=1}^4 m'_{fn} \sin(2\pi l_n \Delta f (t - t')) \right] \right\} \quad (2.8)$$

onde,

$I_p(t)$  = intensidade acústica instantânea do ruído branco, filtrado em banda de oitava, não normalizada

$B$  = constante

$m'_{fn}$  = índice de modulação final não normalizado da  $n$ -ésima frequência de modulação

$t'$  = tempo de atraso

Normalizando-se a equação 2.8, de modo a obter-se novamente o valor do DC igual a um, tem-se:

$$I_f'(t) = I_p'(t) B \left\{ 1 + \left[ \sum_{n=1}^4 (m'_{f_n} / B) \operatorname{sen}(2\pi l_n \Delta f (t - t')) \right] \right\}$$
$$I_f(t) = I_p(t) \left\{ 1 + \left[ \sum_{n=1}^4 m_{f_n} \operatorname{sen}(2\pi l_n \Delta f (t - t')) \right] \right\} \quad (2.9)$$

onde,

$I_f(t)$  = intensidade acústica do sinal de resposta

$I_p(t)$  = intensidade acústica instantânea do ruído  
branco na resposta

$m_{f_n}$  = n-ésimo índice de modulação final

O fator redução de modulação,  $m$ , de cada frequência moduladora, é dado então pela razão entre o índice de modulação final,  $m_f$ , e o índice de modulação inicial,  $m_0$ :

$$m = \frac{m_f}{m_0} \quad (2.10)$$

é o fator redução de modulação que será obtido, através de medições, no método ora proposto para a avaliação da inteligibilidade de salas.

A análise espectral de intensidade envolvida nesta metodologia pode ser atestada por princípios matemáticos. Admita-se que o sinal correspondente à intensidade sonora  $I_p$ , modulada pelas frequências  $f_i$ , conforme a equação 2.5, se apresenta na seguinte forma:

$$I_0(t) = I_b(t) \left\{ 1 + m_0 \left[ \sum_i \text{sen}(2\pi f_i t) \right] \right\} \quad (2.11)$$

A intensidade original  $I_b$  é admitida como uma superposição de funções harmônicas quadráticas, com frequências na faixa de áudio. Analisando-se então uma única destas funções, de frequência genérica  $F_j$ , tem-se na resposta:

$$I_j(t) = B \text{sen}^2(2\pi F_j t) \left\{ 1 + \left[ \sum_i m_{fi} \text{sen}(2\pi f_i t) \right] \right\} \quad (2.12)$$

Com base em relações trigonométricas, verifica-se facilmente que o valor de  $I_j$  é dado portanto por:

$$I_j(t) = (B/2) \left\{ 1 - \cos(4\pi F_j t) + \left[ \sum_i m_{fi} \text{sen}(2\pi f_i t) \right] - \left[ \sum_i (m_{fi}/2) (\text{sen } 2\pi(2F_j - f_i) - \text{sen } 2\pi(2F_j + f_i)) \right] \right\} \quad (2.13)$$

Assim, fica evidente que no espectro de intensidade devem comparecer componentes com frequências de valor igual ao dobro das frequências de áudio originais ( $2F_j$ ), componentes com frequências iguais às frequências de modulação ( $f_i$ ) e ainda componentes com frequências de valores em torno do dobro das frequências de áudio originais ( $2F_j +$  ou  $- f_i$ ). Além das frequências acima descritas aparece, ainda, um componente de frequência nula (DC), ou seja, o termo  $B/2$ .

As figuras apresentadas a seguir, de números 2.5 a 2.14, ilustram as diferenças entre os espectros de um sinal de pressão sonora  $P(t)$ , de um sinal de pressão sonora  $P(t)$  modulado



pela função  $\sqrt{1 + m \sum_i \cos 2\pi f_i t}$ , e as intensidades equivalentes a estes sinais. Utiliza-se, como exemplo, a banda de áudio filtrada em frequência central de 500 Hz.

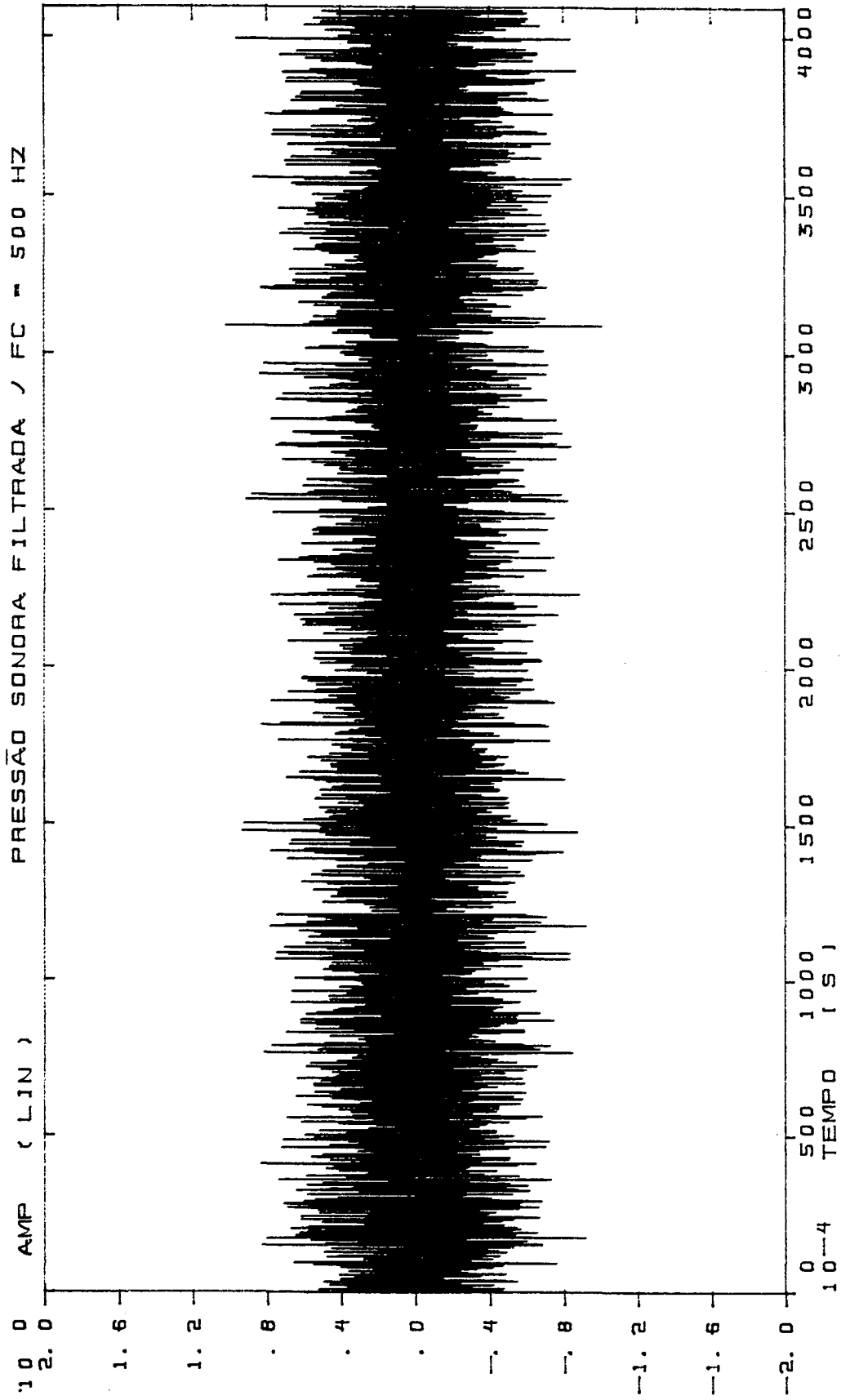


Figura 2.5 - Pressão sonora do ruído branco, filtrado na banda de oitava com  $F_c = 500$  Hz.

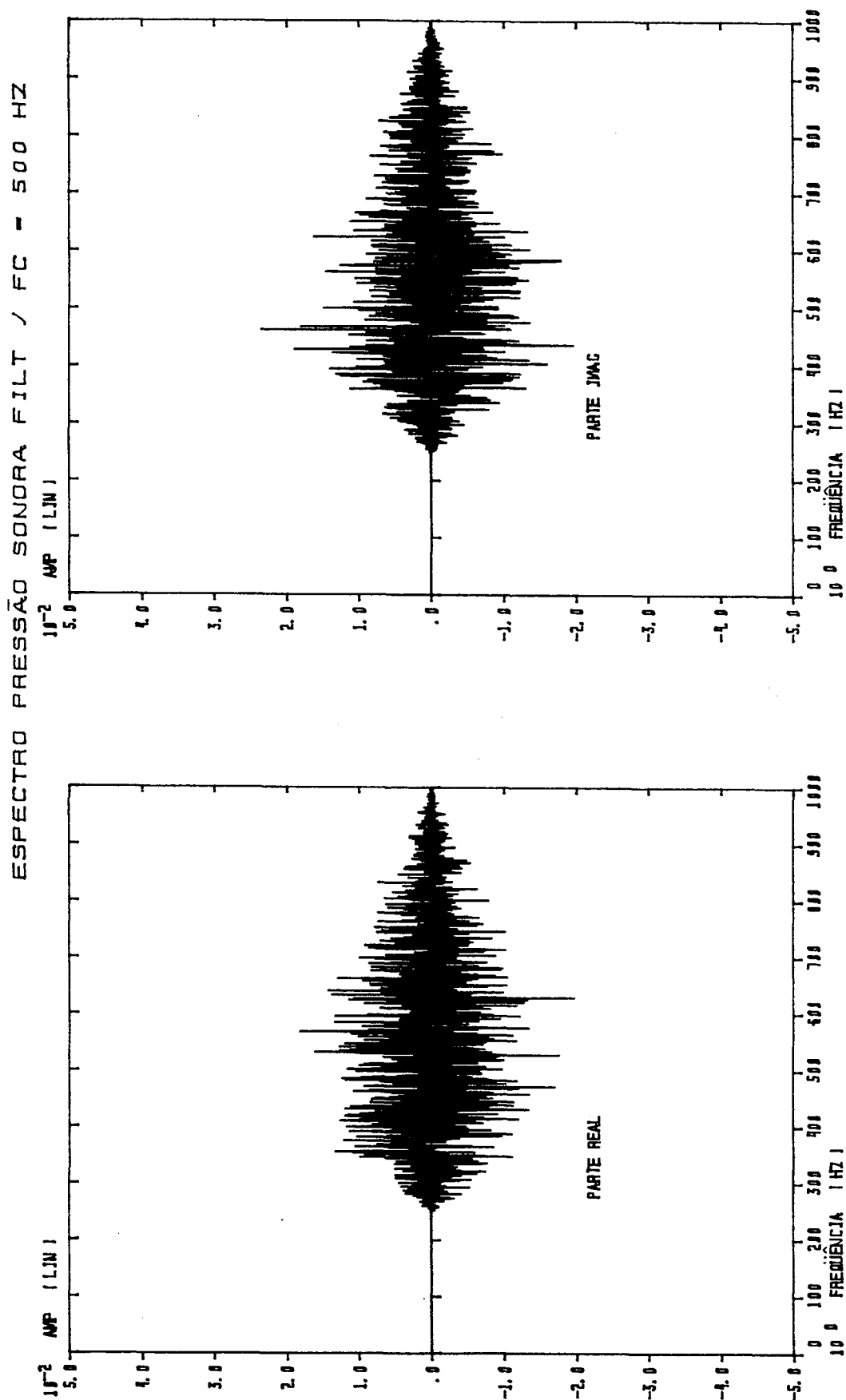


Figura 2.6 - Espectro da pressão sonora do ruído branco, filtrado na banda de oitava com  $F_c = 500$  Hz.

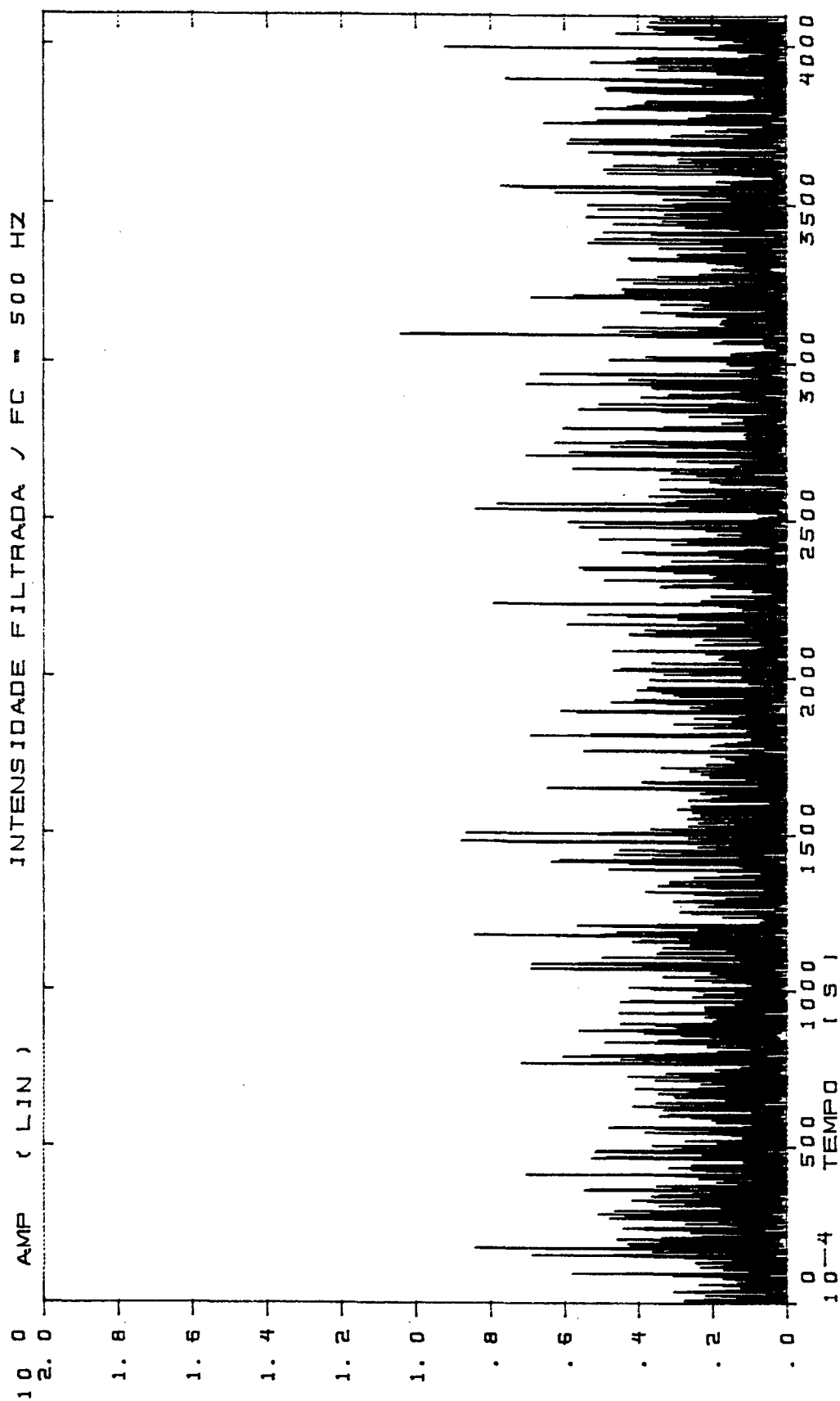


Figura 2.7 - Sinal proporcional à função de intensidade do ruído branco, filtrado na banda de oitava com  $F_c = 500$  Hz. Este sinal é o mesmo apresentado na figura 2.5, elevado ao quadrado.

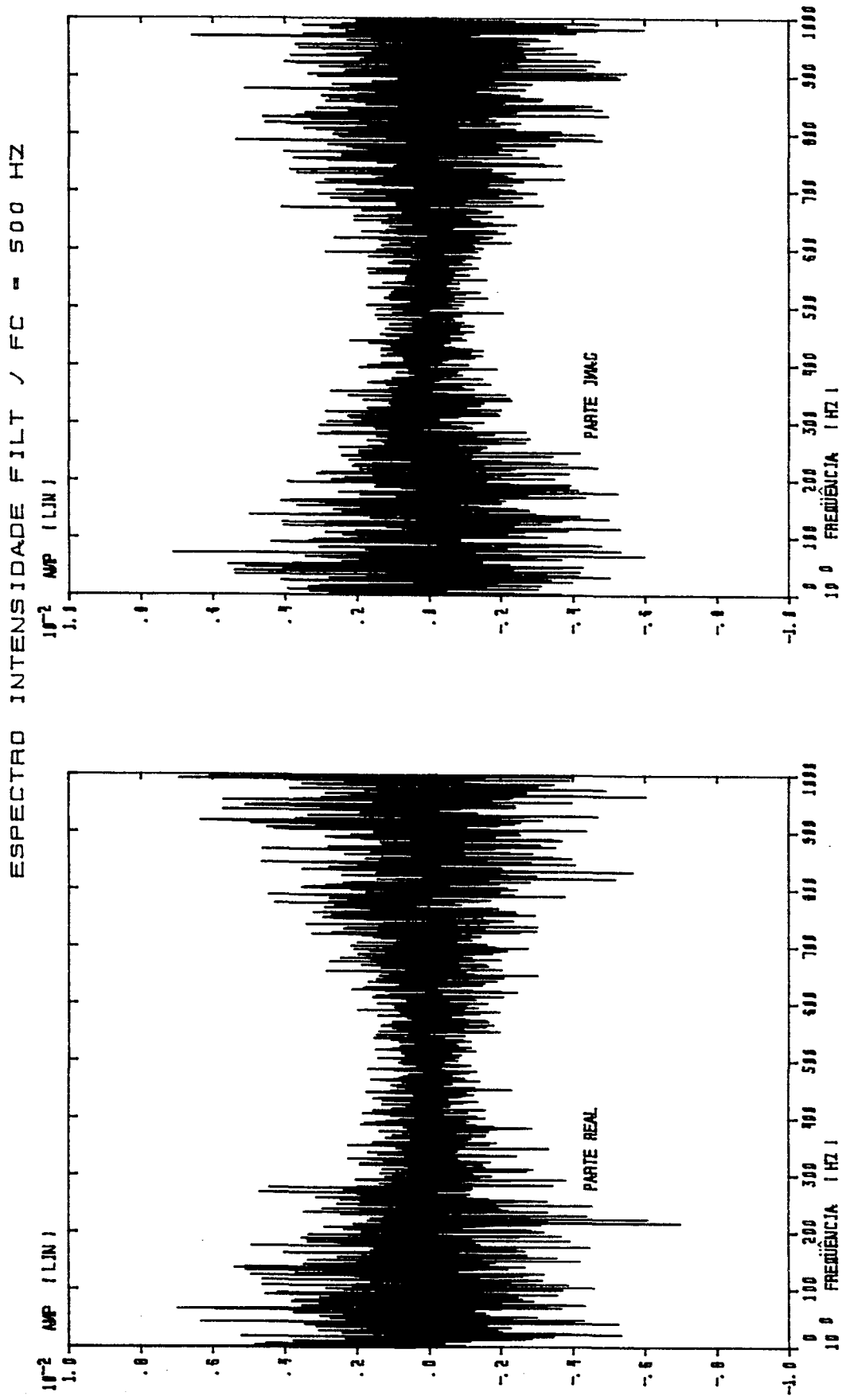


Figura 2.8 - Espectro do sinal proporcional à função de intensidade do ruído branco, filtrado na banda de oitava com  $F_c = 500$  Hz.

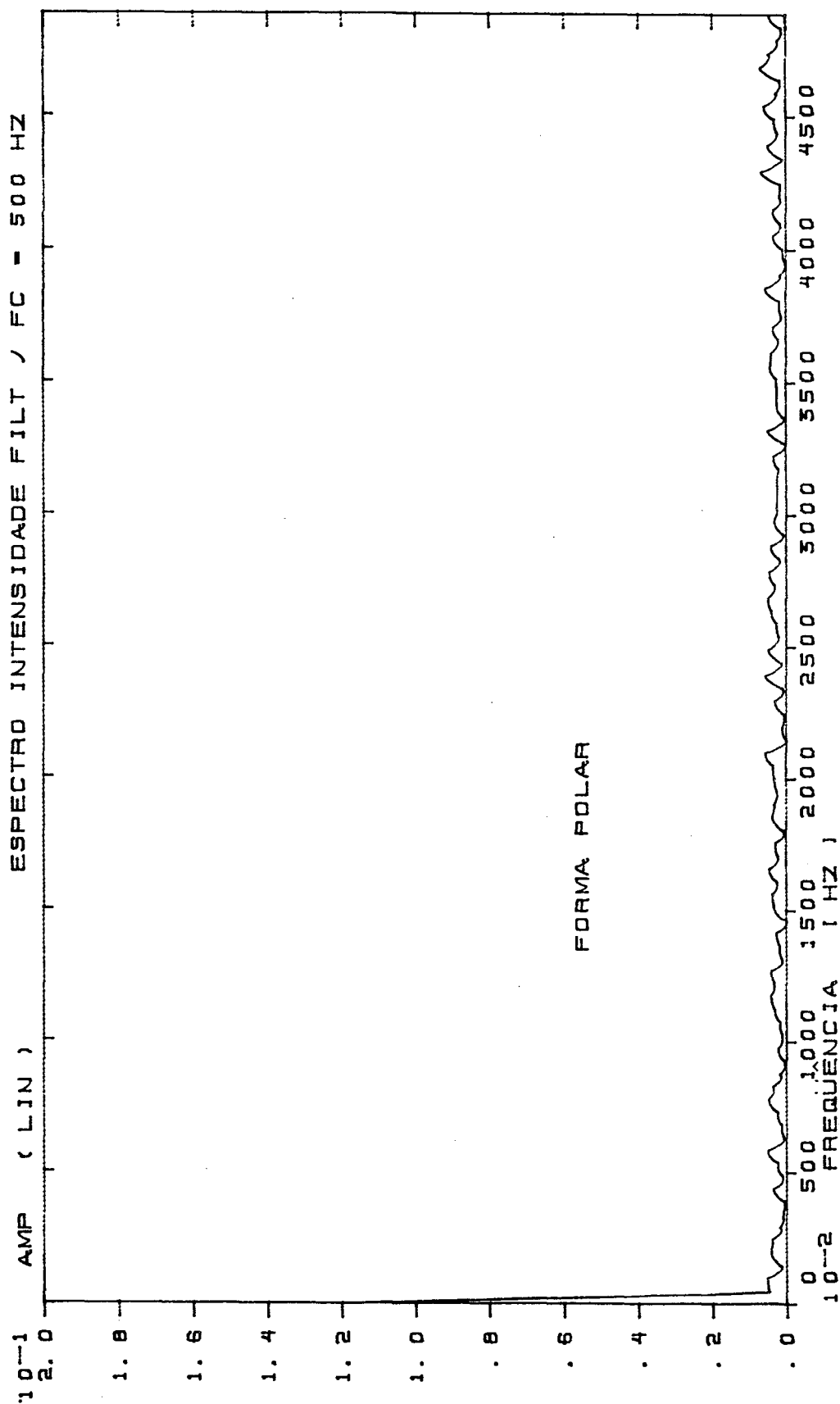


Figura 2.9 - Módulo do espectro, na forma polar, do sinal proporcional à intensidade do ruído branco, filtrado na banda de oitava com  $F_c = 500$  Hz. Observa-se a pequena magnitude das baixas frequências em relação ao valor DC do sinal.

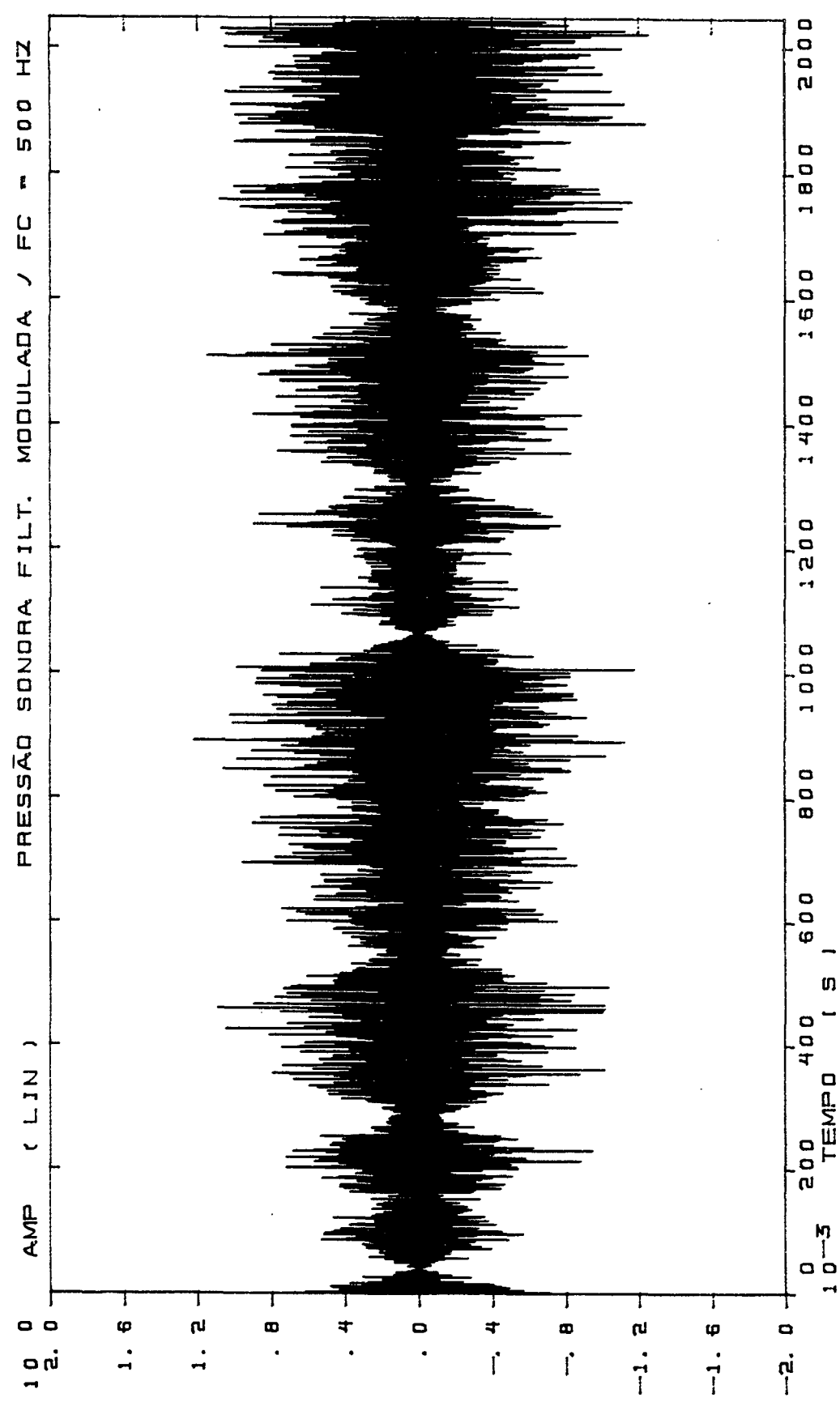


Figura 2.10 - Pressão sonora do ruído branco modulado, filtrado na banda de oitava com  $F_c = 500$  Hz.

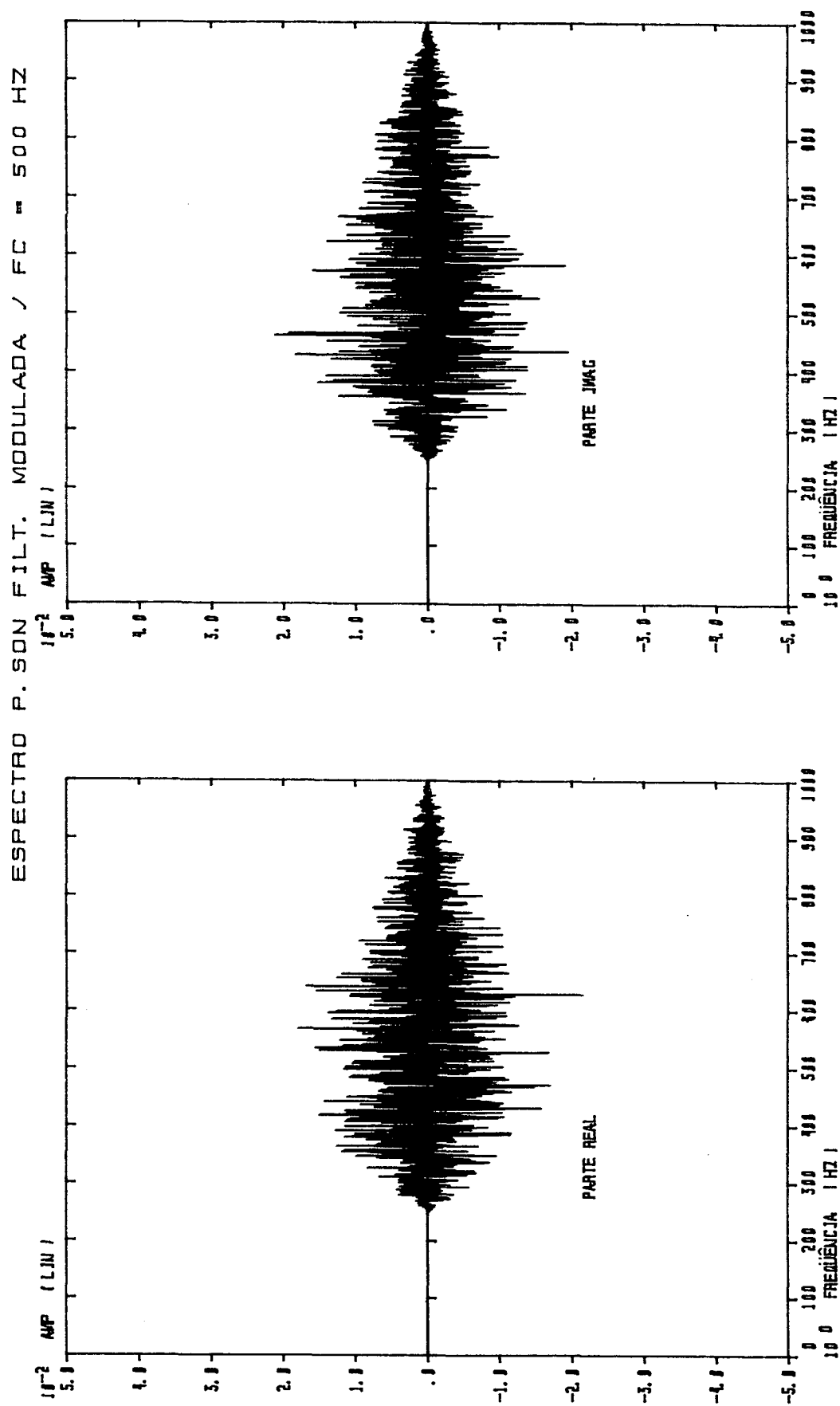


Figura 2.11 - Espectro da pressão sonora do ruído branco modulado, filtrado na banda de oitava com  $F_c = 500$  Hz.



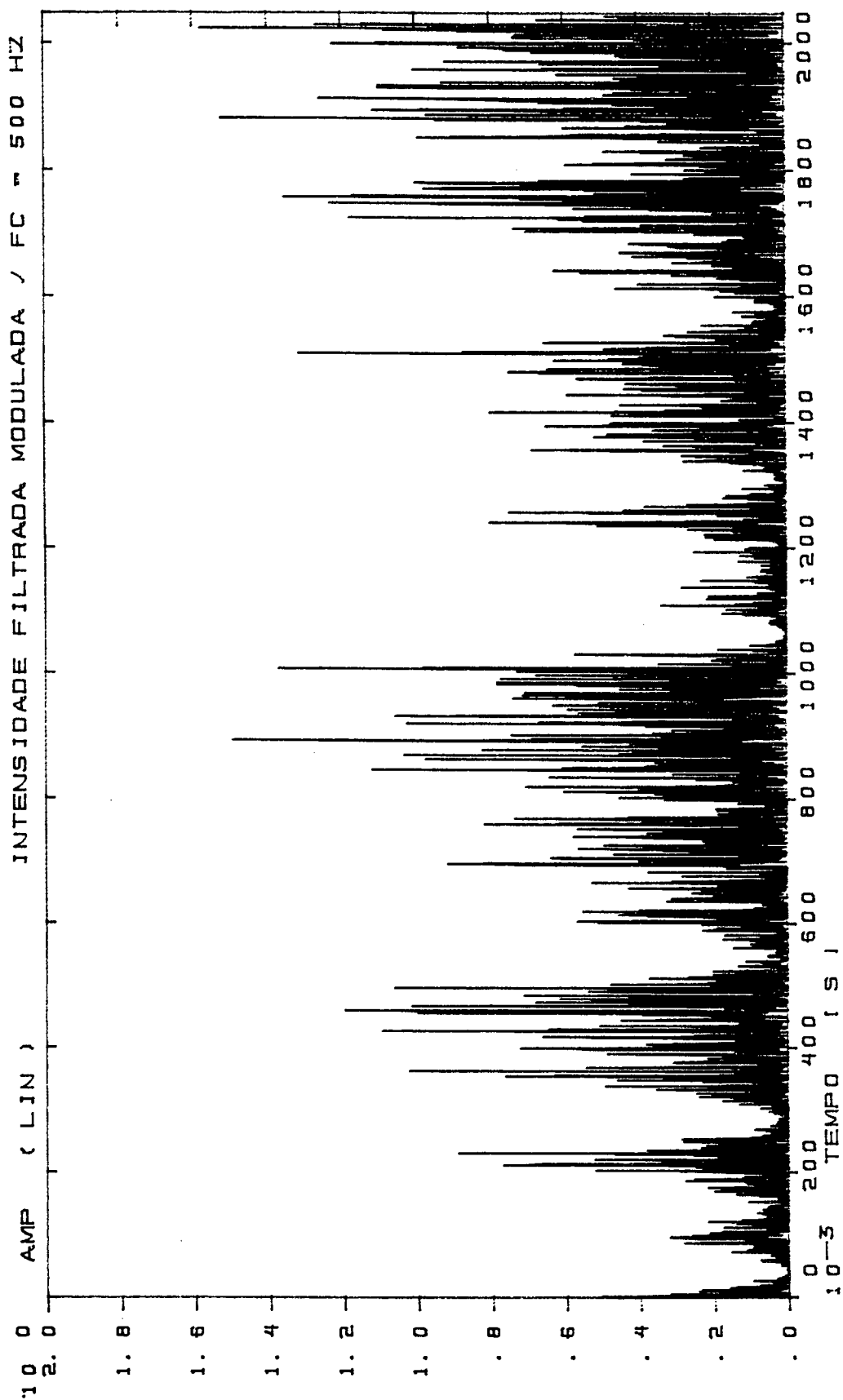


Figura 2.12 - Sinal proporcional à função de intensidade do ruído branco modulado, filtrado na banda de oitava com  $F_c = 500$  Hz. Este sinal é o mesmo apresentado na figura 2.10, elevado ao quadrado.

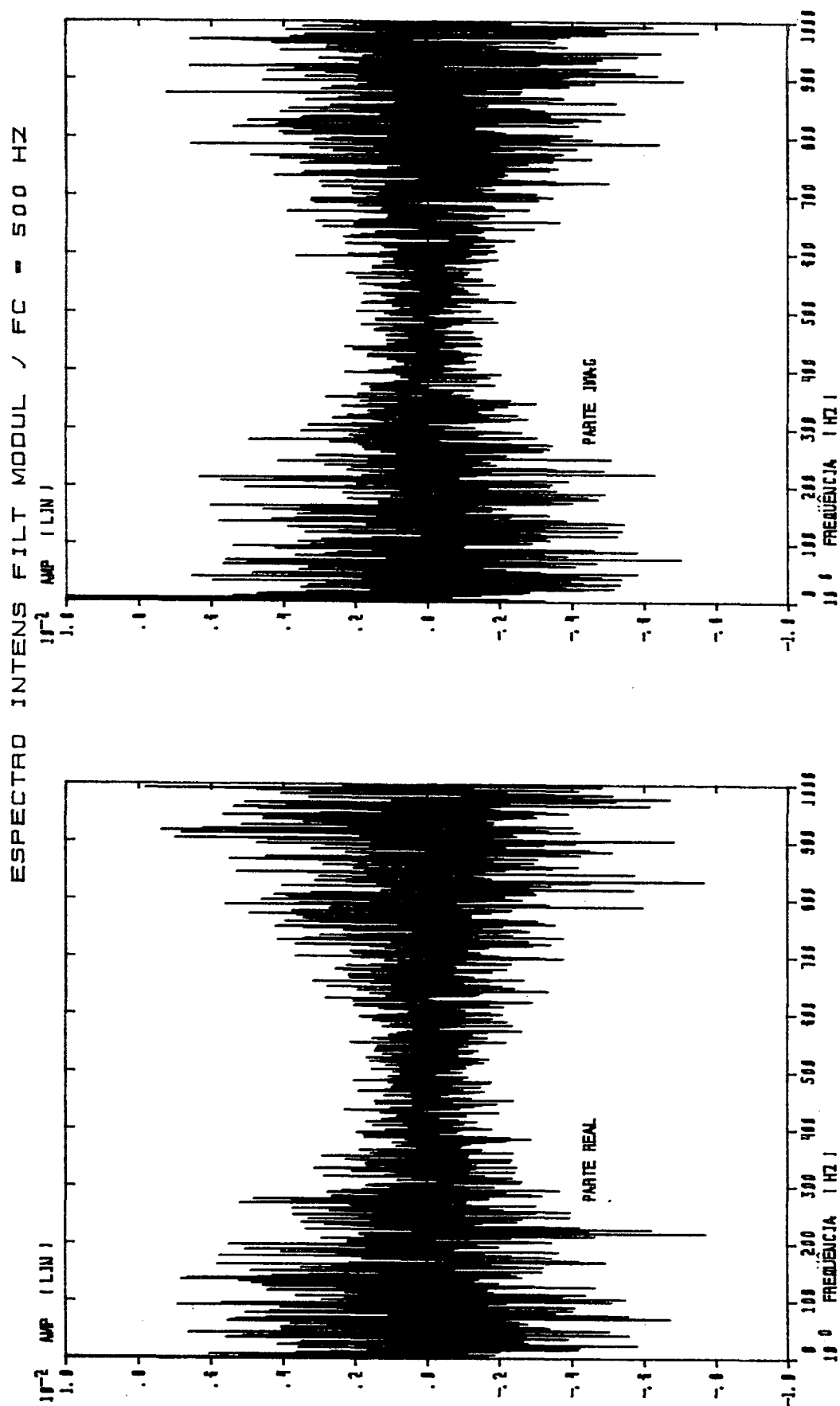


Figura 2.13 - Espectro do sinal proporcional à função de intensidade do ruído branco modulado, filtrado na banda de oitava com  $F_c = 500$  Hz.

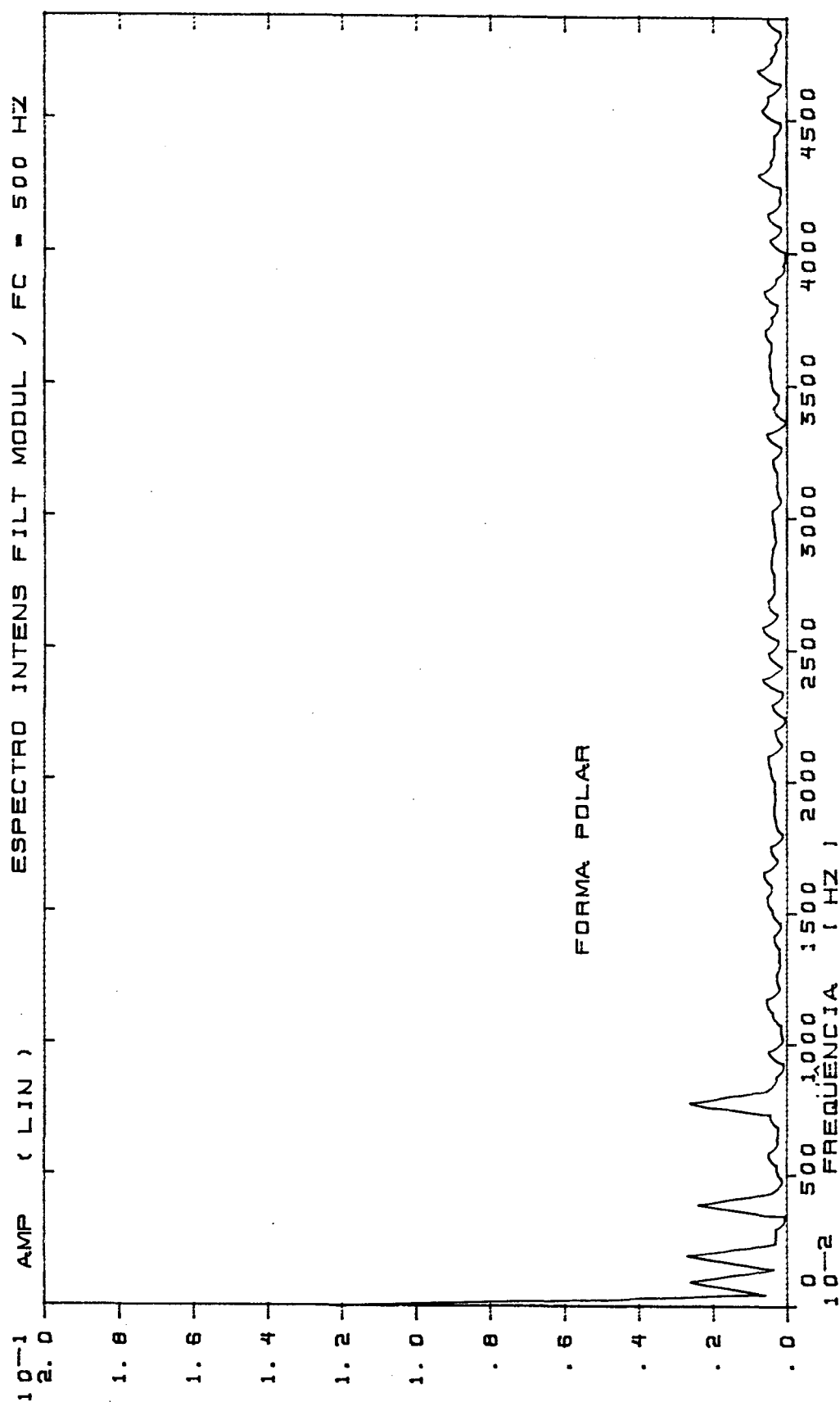


Figura 2.14 - Módulo do espectro, na forma polar, do sinal proporcional à intensidade do ruído branco modulado, filtrado na banda de oitava com  $F_c = 500$  Hz. Comparada à figura 2.9 observam-se as 4 frequências moduladoras utilizadas.

## CAPÍTULO 3

### TÉCNICA DE MEDIÇÃO

Neste capítulo são apresentadas as etapas da geração do sinal de teste, bem como o processamento e a análise dos sinais de respostas, realizados no analisador digital HP 5451C.

#### 3.1 GERAÇÃO DO SINAL DE TESTE

Neste tópico são apresentados os parâmetros adotados para cada banda de oitava do sinal de teste e a sequência na composição deste sinal.

##### 3.1.1 Parâmetros Adotados

Os parâmetros envolvidos no processamento de sinais do analisador digital utilizado neste estudo, que determinam a resolução em frequência, são o número de pontos adotados e a frequência de amostragem,  $F_a$ , que, neste analisador, em especial, é sempre duas vezes a frequência máxima,  $F_{max}$ .

Com a frequência máxima sintonizada, a discretização dos sinais é função do número de pontos escolhidos, podendo-se

usar 64 pontos ou números múltiplos deste, até um máximo de 4.096 pontos (conforme algoritmo FFT). Utilizando-se a maior resolução permitida, o intervalo em frequência será dado por:

$$\Delta f = \frac{\text{frequência de amostragem}}{4.096 \text{ pontos}} \quad (3.1)$$

O resumo dos parâmetros utilizados para as 4 bandas de oitava do sinal de teste, mostrando as frequências centrais,  $F_c$ , as frequências máximas,  $F_{max}$ , do HP 5451C, as frequências de amostragem,  $F_a$ , e a resolução em frequência, está apresentado na tabela 3.1.

Quando o sinal processado estiver no domínio da frequência, a quantidade de pontos é distribuída de acordo com as expressões:

$$\text{Parte Real} = \frac{\text{Número de pontos}}{2} + 1 \quad (3.2)$$

$$\text{Parte Imaginária} = \frac{\text{Número de pontos}}{2} - 1$$

sendo cada ponto correspondente a um canal dos blocos de armazenamento de sinais.

TABELA 3.1 - Parâmetros adotados

Fc [Hz]	Fmax [Hz]	Fa [Hz]	$\Delta f$ [Hz]
250	500	1 k	0,2442
500	1 k	2 k	0,4883
1000	2,5 k	5 k	1,2212
2000	5 k	10 k	2,4424

Deve-se ressaltar que a quantidade de blocos disponíveis, ou seja, a capacidade de armazenamento de dados em memória "volátil" do analisador, é fixa. Portanto, quanto maior o número de pontos adotados na discretização dos sinais, maior parcela da memória será ocupada. Assim, para que se consiga utilizar o número máximo de pontos, é, algumas vezes, necessário registrar-se em memória "fixa" certas etapas do processamento.

### 3.1.2 Etapas da Composição do Sinal

Com os parâmetros de utilização do analisador digital definidos, procedeu-se à geração das 4 bandas de oitava do sinal de teste.

Como já apresentado no capítulo 2, ver expressão 2.5, a intensidade sonora dos 4 componentes do sinal de teste,  $I_0(t)$ , pode ser descrita genericamente por:

$$I_0(t) = I_b(t) \left\{ 1 + m_0 \left[ \sum_{n=1}^4 \text{sen}(2\pi l_n \Delta f t) \right] \right\} \quad (3.3)$$

onde,

$I_b(t)$  = intensidade acústica instantânea do ruído branco filtrado em banda de oitava

$m_0$  = índice de modulação inicial

$l_n$  = número inteiro

$\Delta f$  = resolução em frequência

$l_n \Delta f$  = n-ésima frequência de modulação

Sendo o quadrado da pressão sonora, de acordo com a expressão 2.7, proporcional à intensidade, a função da pressão das 4 bandas do sinal de teste,  $P_0(t)$ , pode ser expressa por:

$$P_0(t) = P_b(t) \left\{ \sqrt{1 + m_0 \left[ \sum_{n=1}^4 \text{sen}(2\pi l_n \Delta f t) \right]} \right\} \quad (3.4)$$

onde  $P_b$  é a amplitude da pressão sonora do ruído branco filtrado em banda de oitava.

Estas são as funções realmente geradas no analisador para excitação acústica do ambiente a ser avaliado.

Como primeira etapa da elaboração de cada banda componente de teste, gerou-se cada um dos senos que compõem a expressão 3.4 separadamente. Estes foram gerados, em frequência, através de valores unitários discretos posicionados nos canais correspondentes das partes imaginárias dos blocos de

armazenamento. Efetuaram-se, a seguir, suas transformadas discretas inversas de Fourier e as quatro funções harmônicas foram somadas no domínio de tempo.

Os sinais resultantes são apresentados nas figuras 3.1 a 3.4. As diferenças de valores das frequências de modulação em relação às frequências centrais de 1/3 de oitava são mostradas na tabela 3.2 em valores percentuais e em frequência, e, para que sirva de referencial, apresentam-se também as frequências utilizadas pelo equipamento da Brüel & Kjaer para medição do índice de RASTI [11]. A obtenção de tais frequências de modulação encontra-se, à exceção da frequência de 1,709 Hz, de acordo com a norma [10], que recomenda a diferença máxima de mais ou menos 5%.

Após multiplicar-se o somatório de funções pelo índice de modulação inicial, tendo como resultado os sinais mostrados nas figuras 3.5 a 3.8, somou-se a cada sinal a constante DC de amplitude um, resultando nos sinais mostrados nas figuras 3.9 a 3.12.

Para operar-se a raiz quadrada destes sinais foi necessária a criação de pequeno programa computacional que, após executado, traz, como resultado, o sinal que modulará a função da pressão sonora do ruído branco. O programa encontra-se apresentado no Apêndice B, com os resultados de sua aplicação, as funções moduladoras, ilustrados nas figuras 3.13 a 3.16.



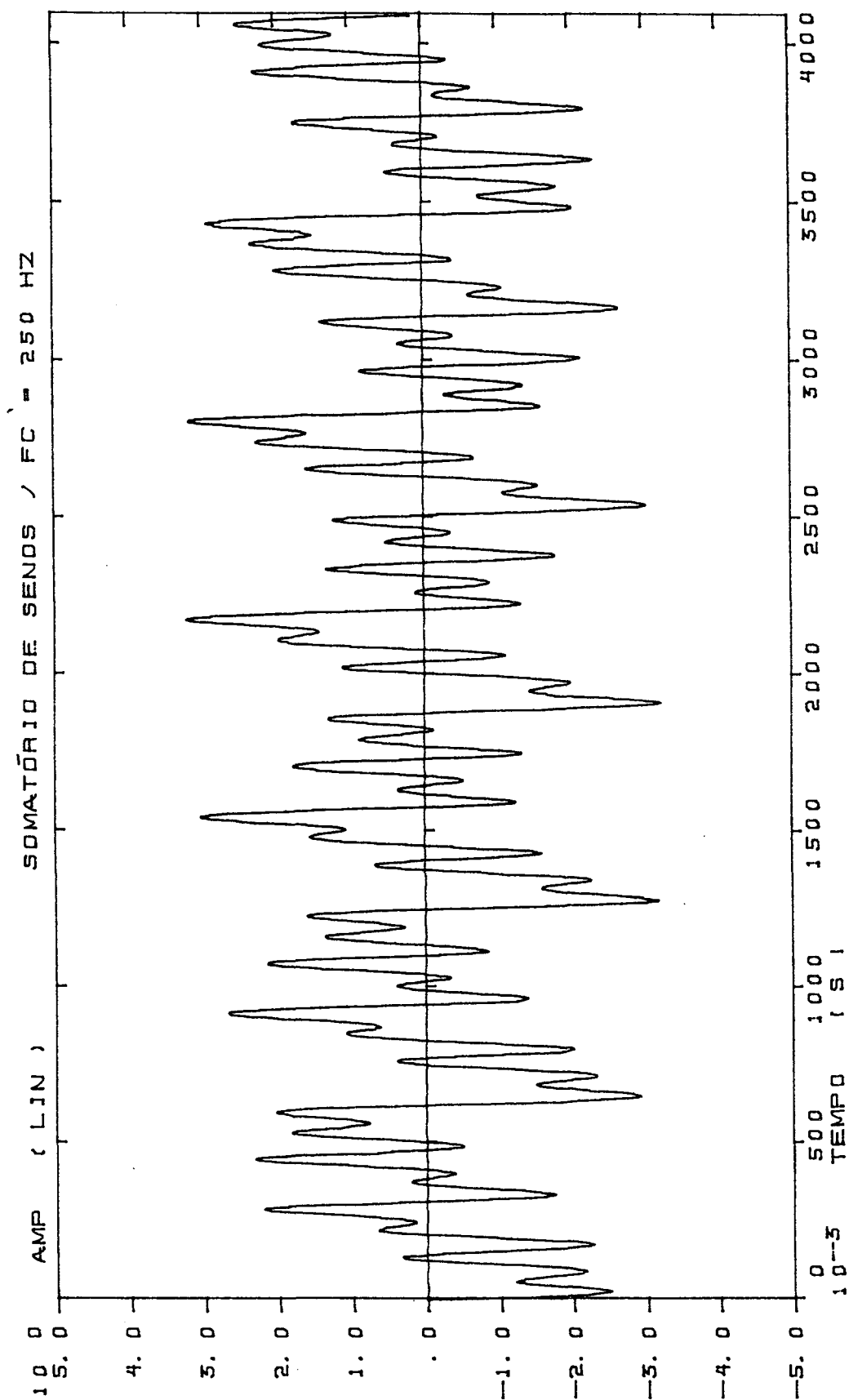


Figura 3.1 - Sinal resultante do somatório de quatro funções senos, de frequências 1,6 Hz, 3,15 Hz, 6,3 Hz e 12,5 Hz.

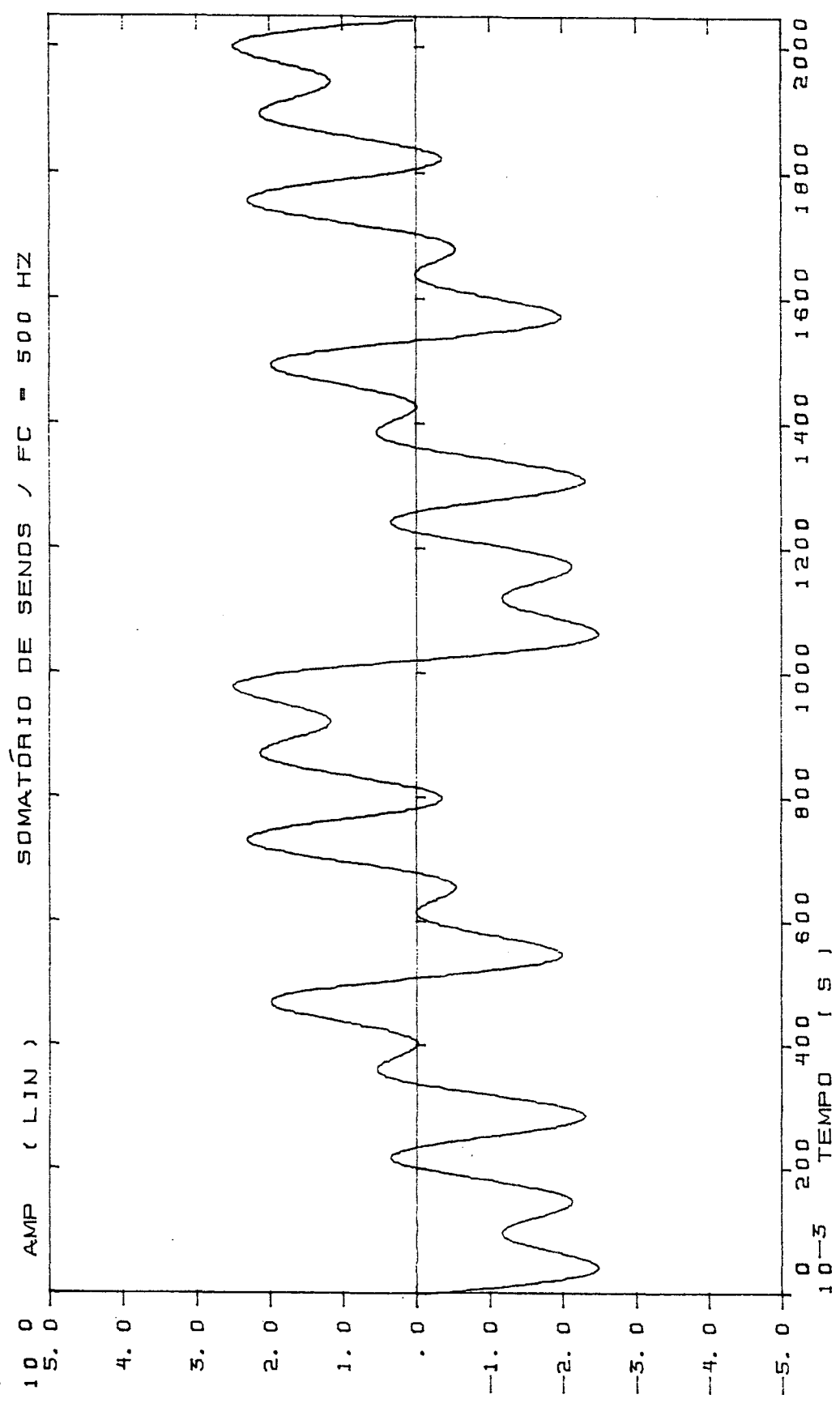


Figura 3.2 - Sinal resultante do somatório de quatro funções senos, de frequências 1 Hz, 2 Hz, 4 Hz e 8 Hz.

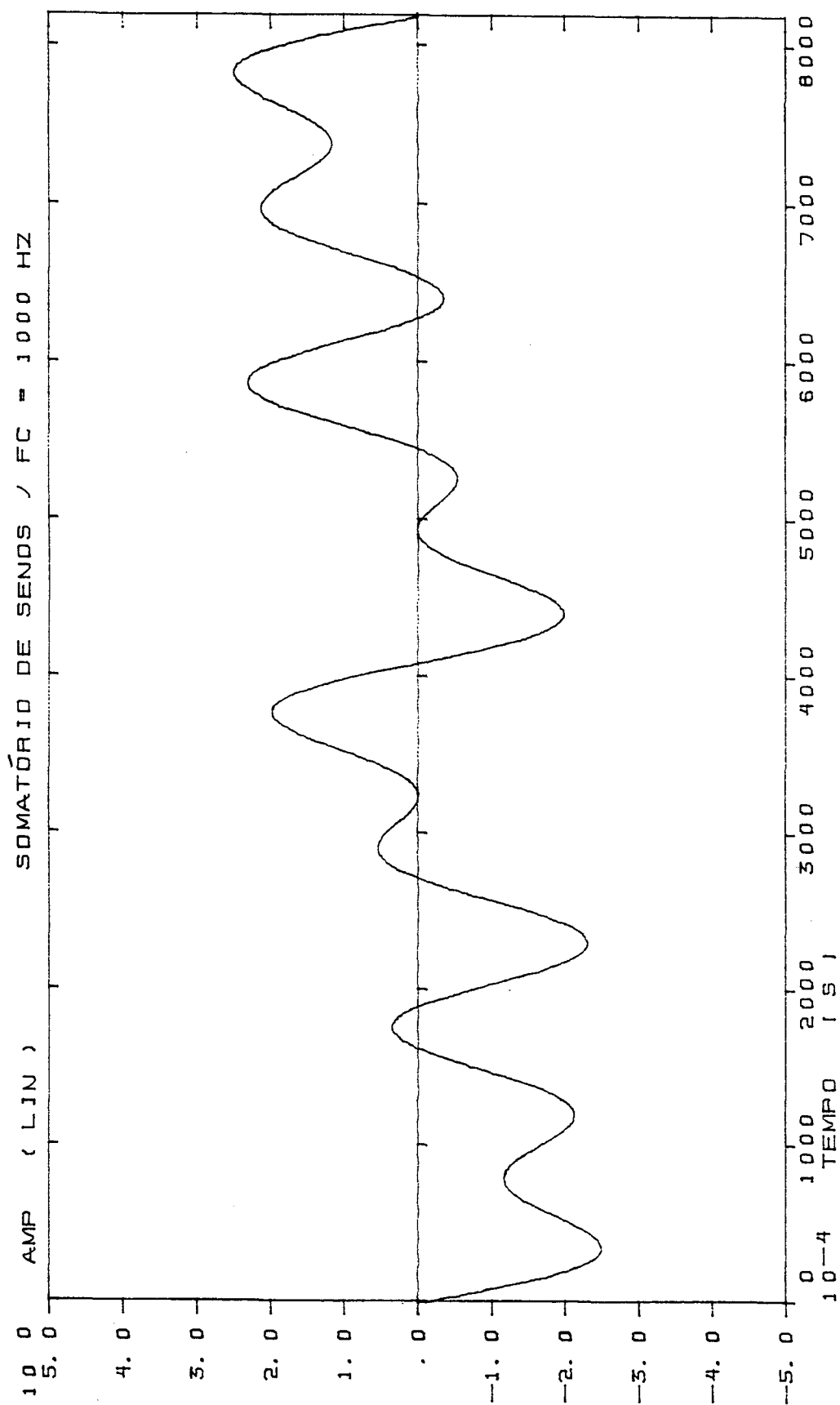


Figura 3.3 - Sinal resultante do somatório de quatro funções senos, de frequências 1,25 Hz, 2,5 Hz, 5 Hz e 10 Hz.

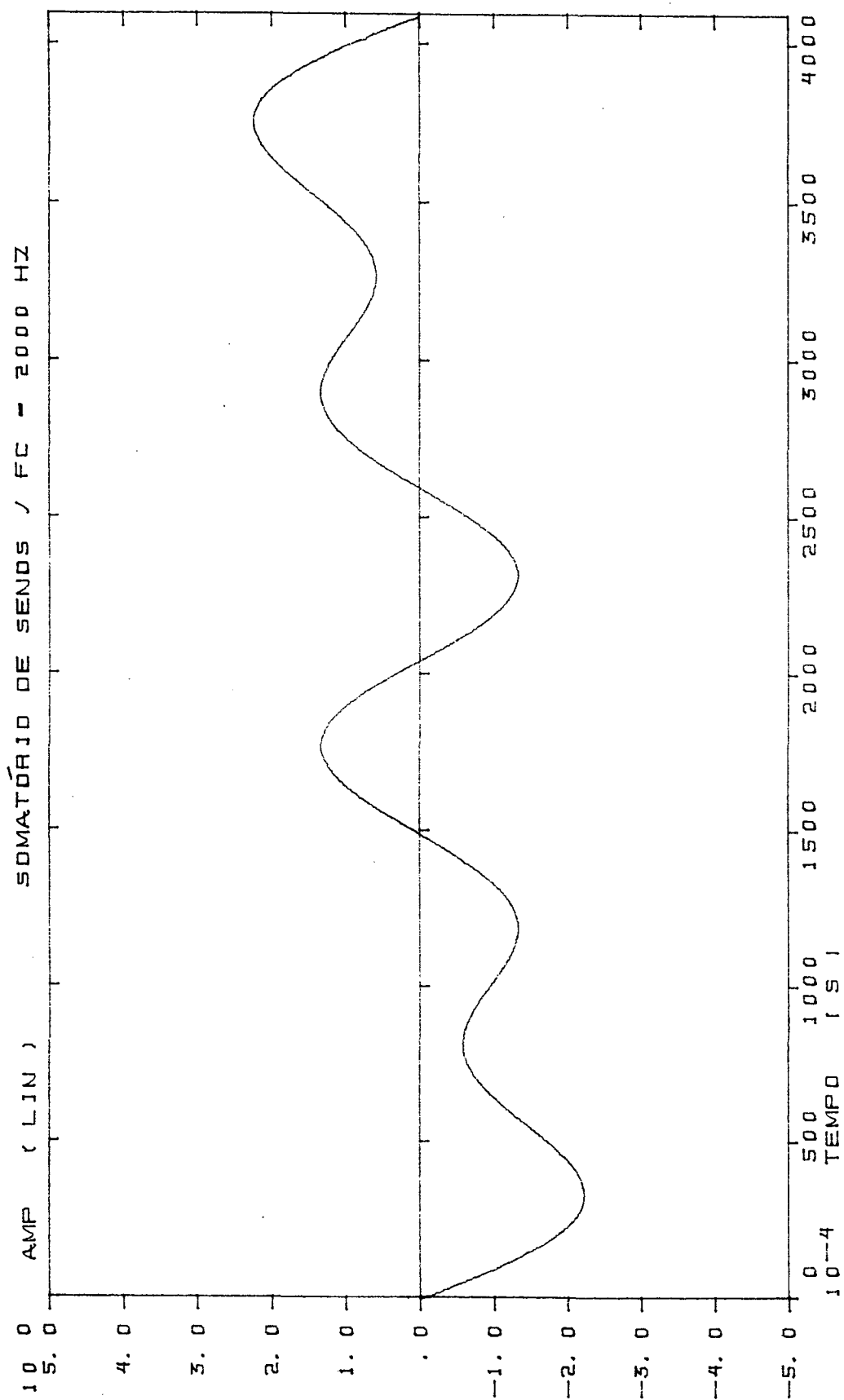


Figura 3.4 - Sinal resultante do somatório de três funções senos, de frequências de 2,5 Hz, 5 Hz e 10 Hz.

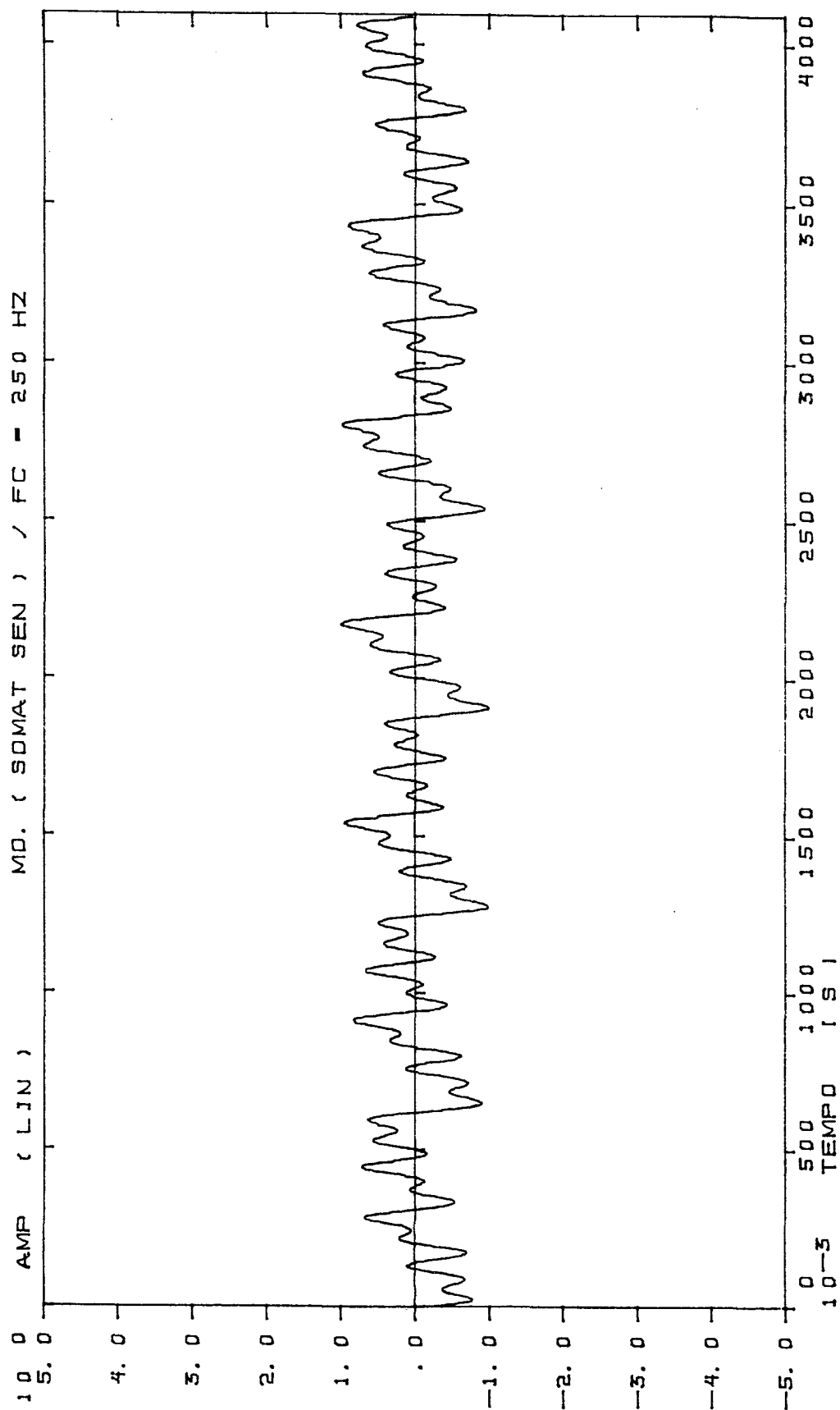


Figura 3.5 - Sinal resultante da multiplicação do somatório de senos, apresentado na figura 3.1, pela constante 0,31.

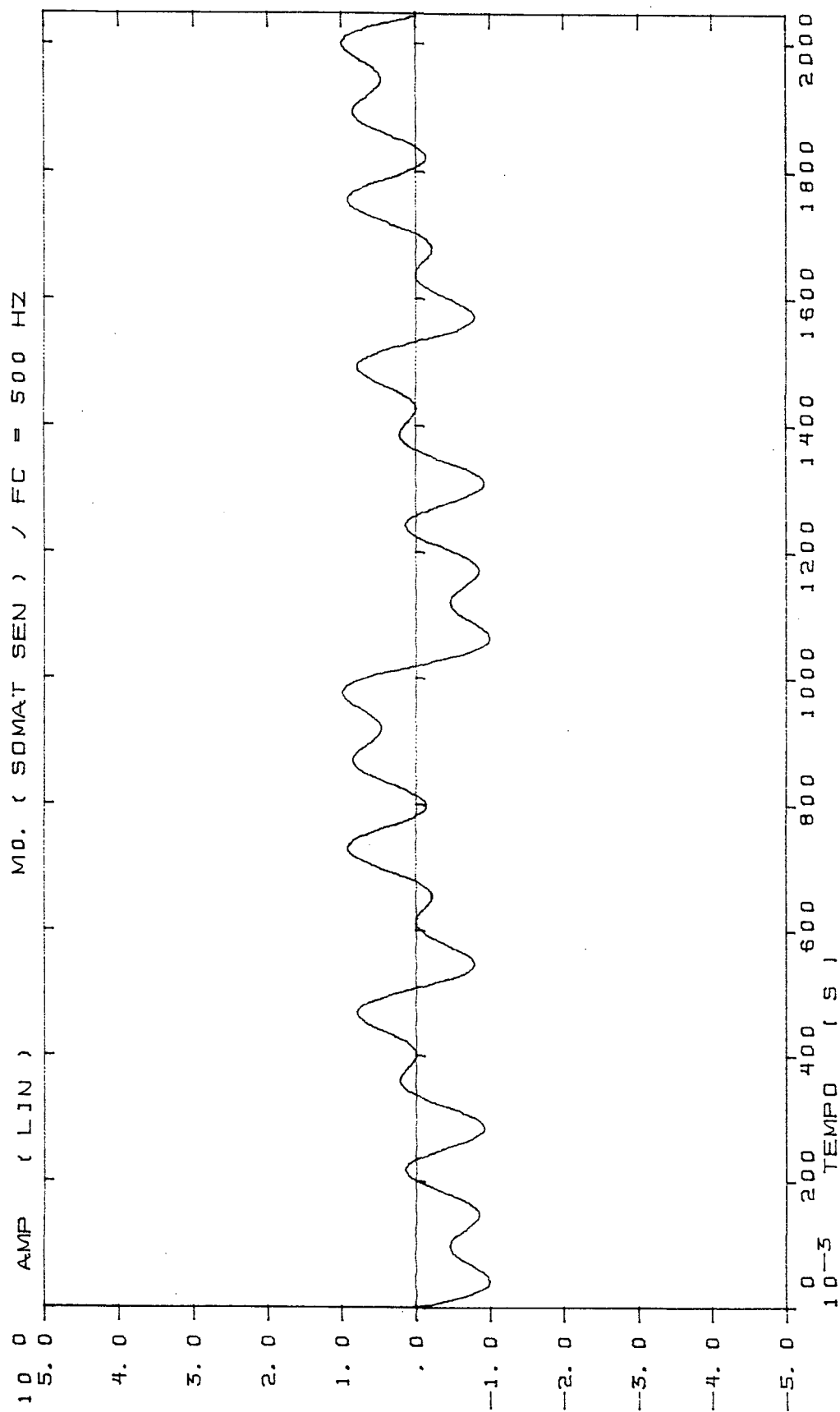


Figura 3.6 - Sinal resultante da multiplicação do somatório de senos, apresentado na figura 3.2, pela constante 0,40.

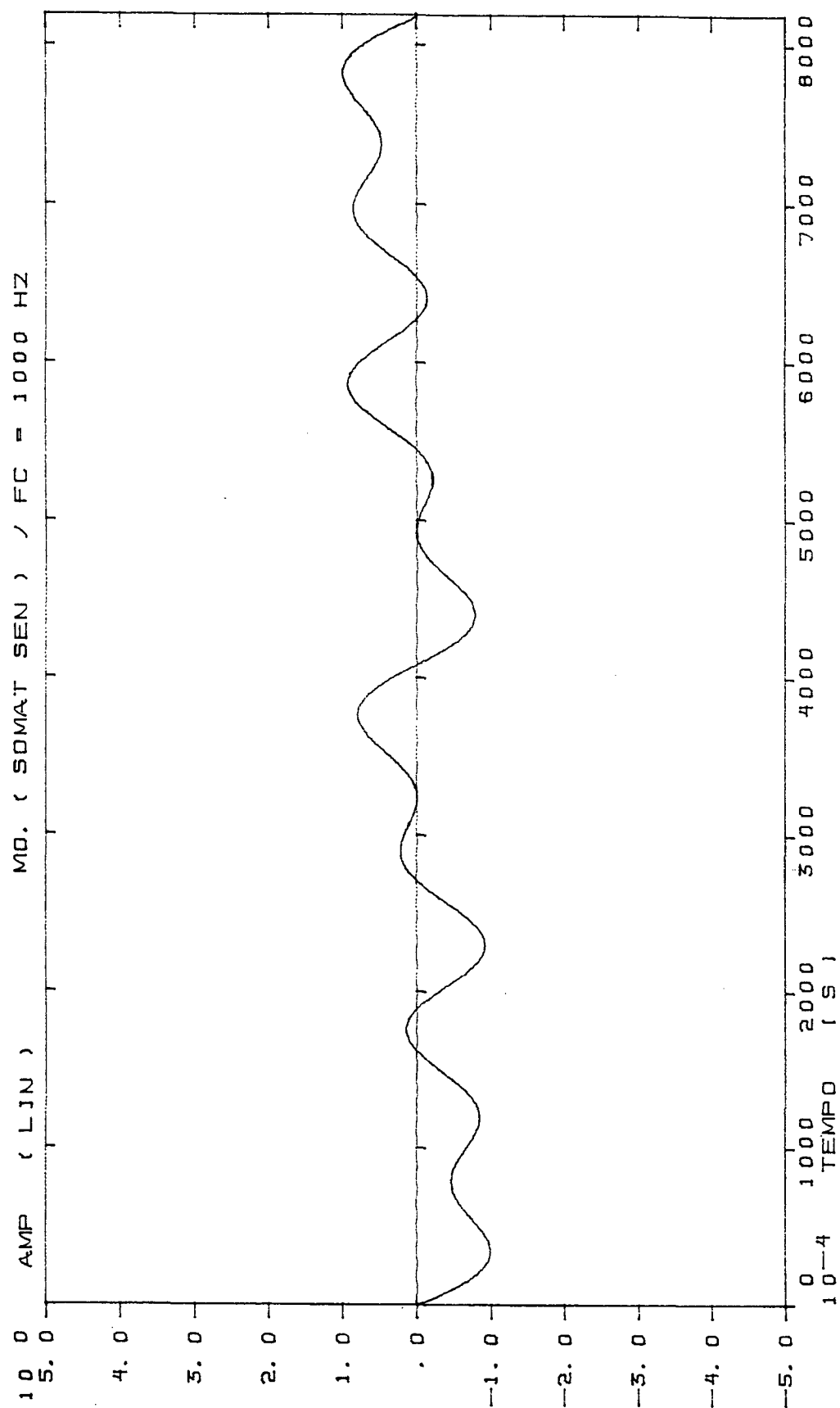


Figura 3.7 - Sinal resultante da multiplicação do somatório de senos, apresentado na figura 3.3, pela constante 0,40.

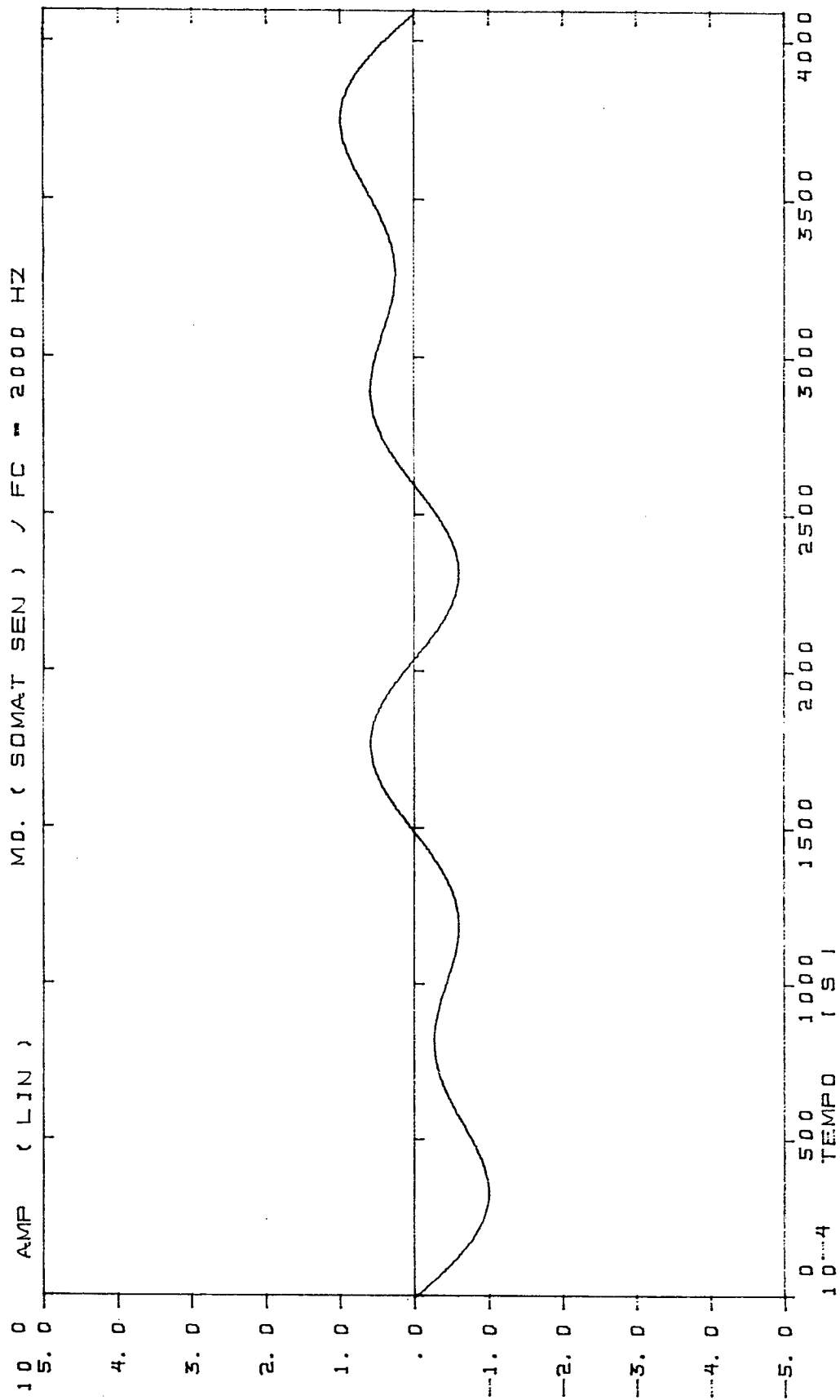


Figura 3.8 - Sinal resultante da multiplicação do somatório de senos, apresentado na figura 3.4, pela constante 0,448.



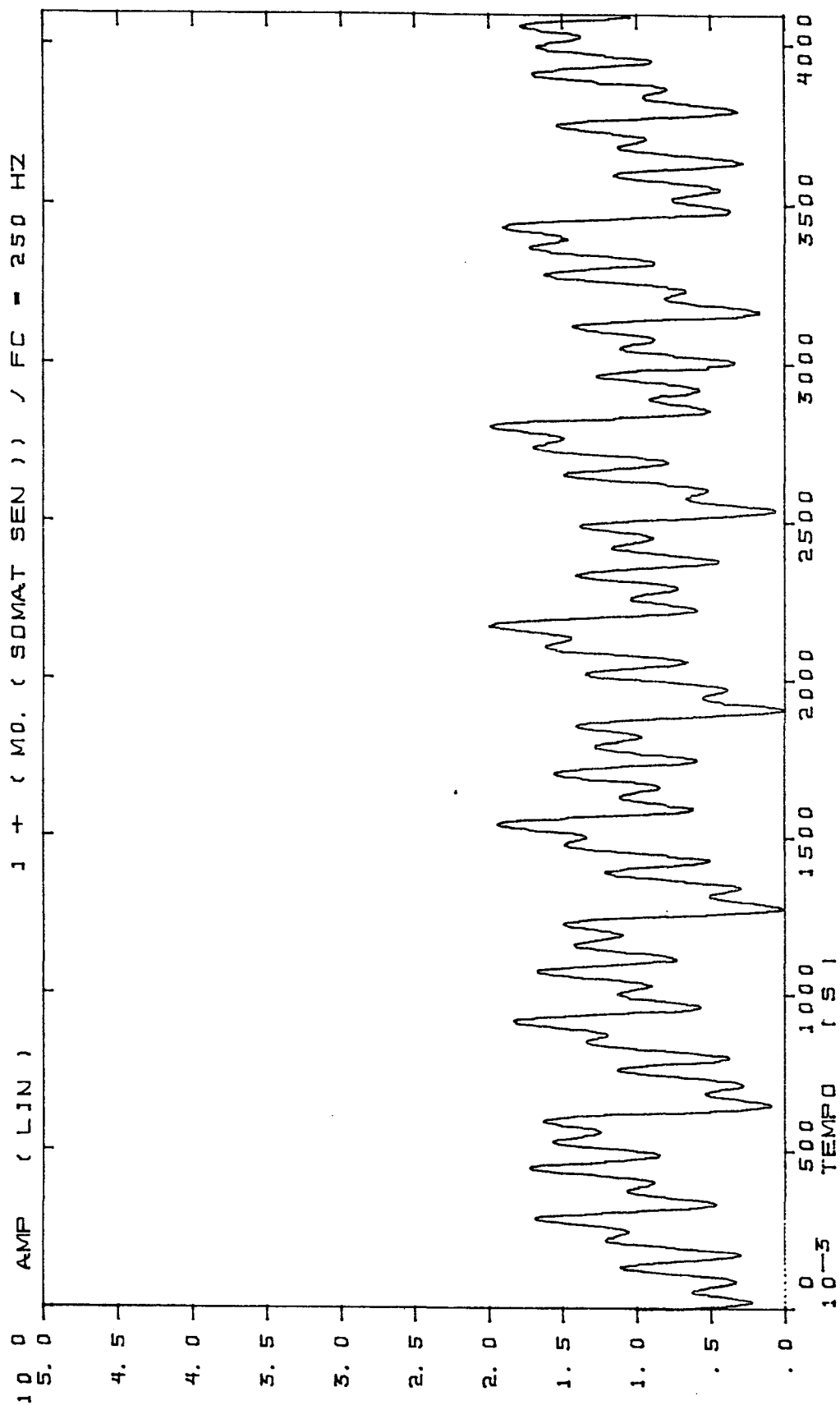


Figura 3.9 - Sinal resultante da soma da constante um ao sinal apresentado na figura 3.5.

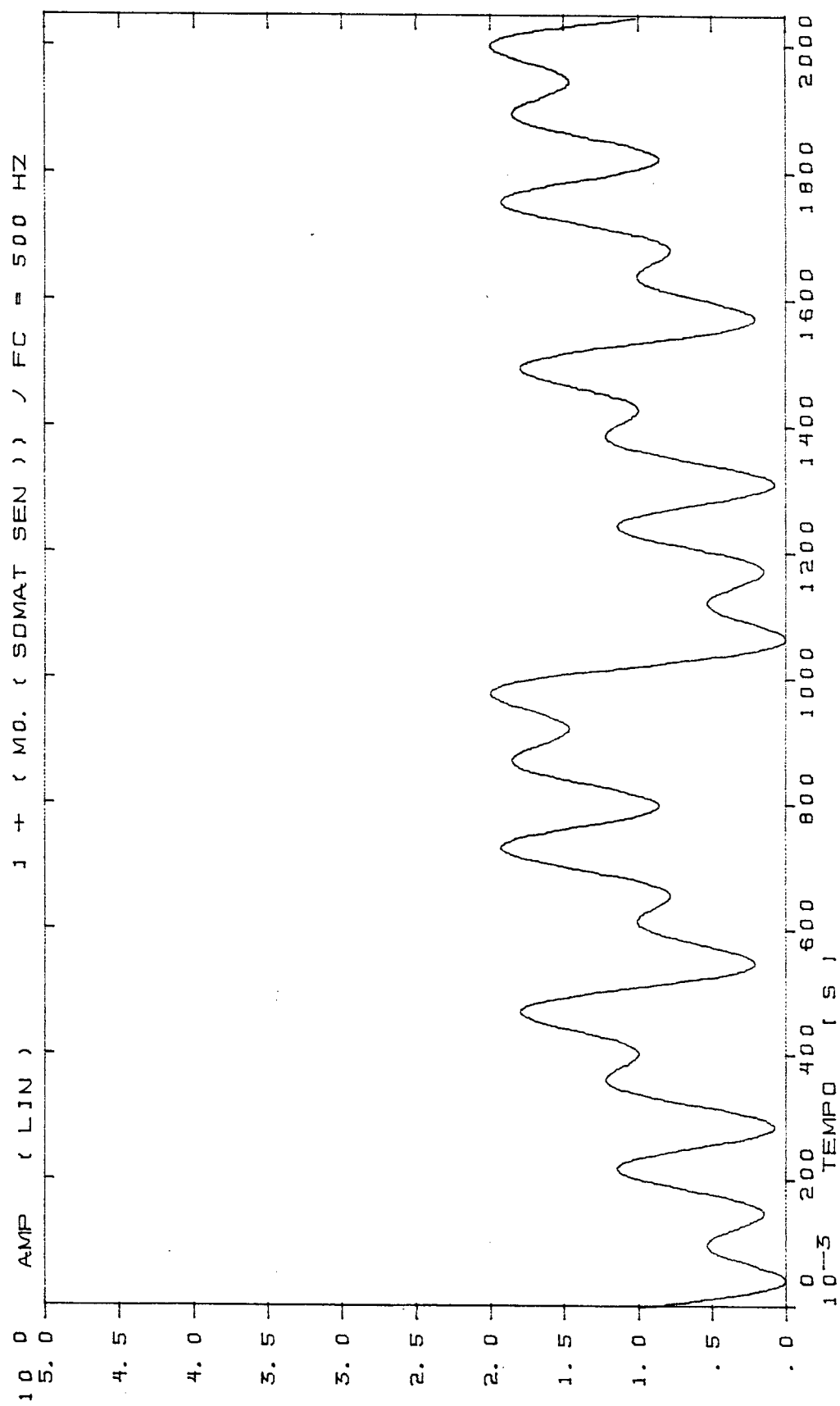


Figura 3.10 - Sinal resultante da soma da constante um ao sinal apresentado na figura 3.6.

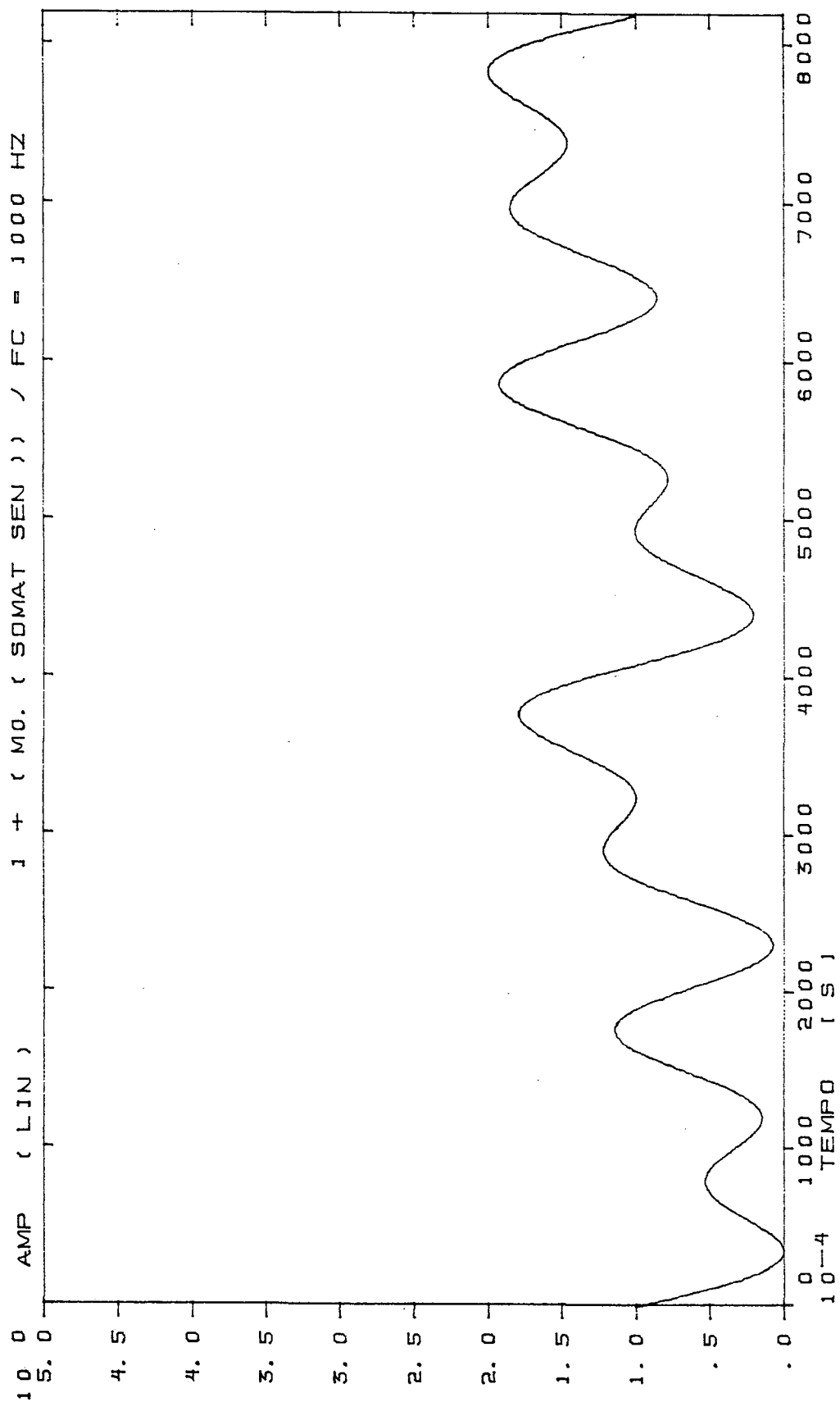


Figura 3.11 - Sinal resultante da soma da constante um ao sinal apresentado na figura 3.7.

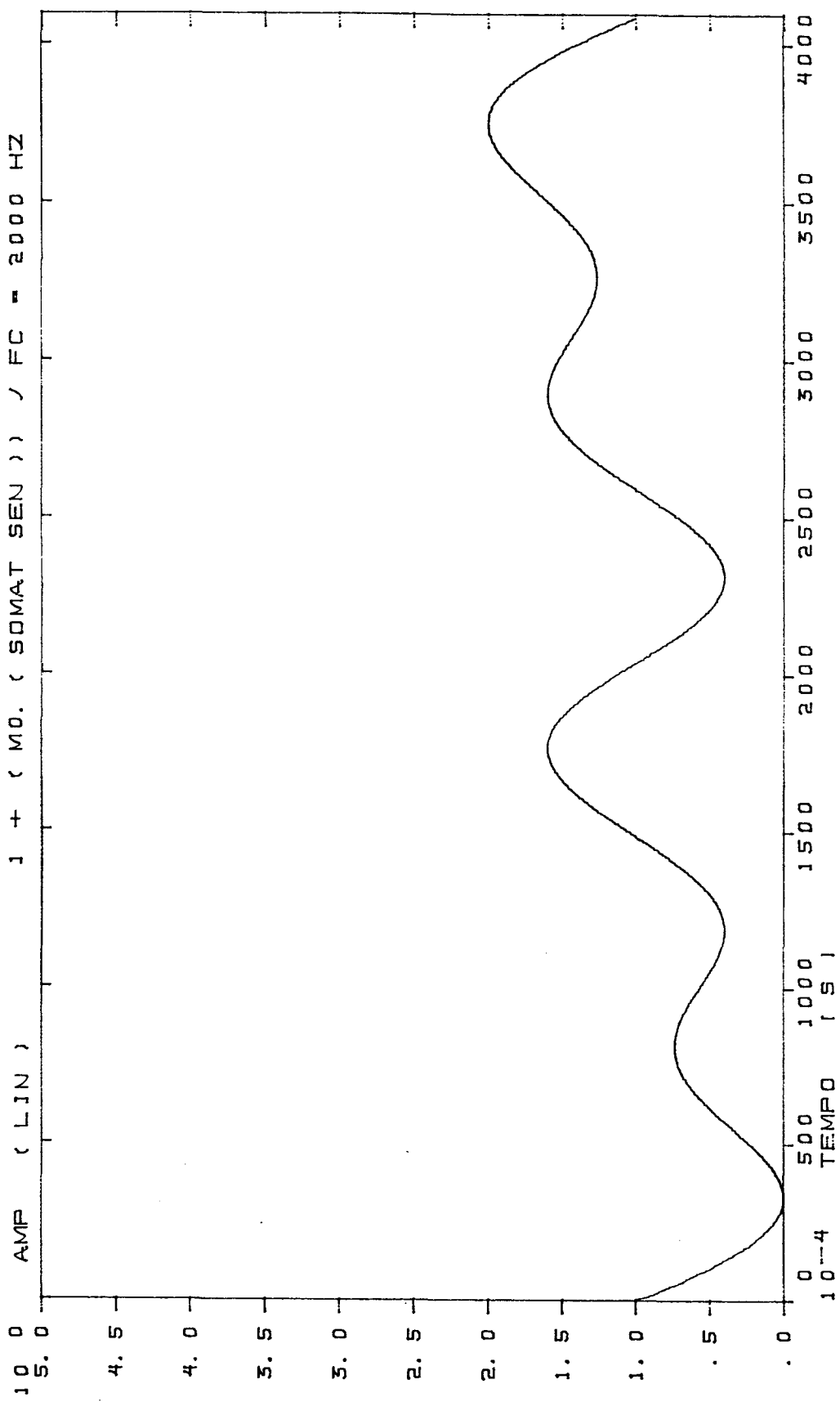


Figura 3.12 - Sinal resultante da soma da constante um ao sinal apresentado na figura 3.8.

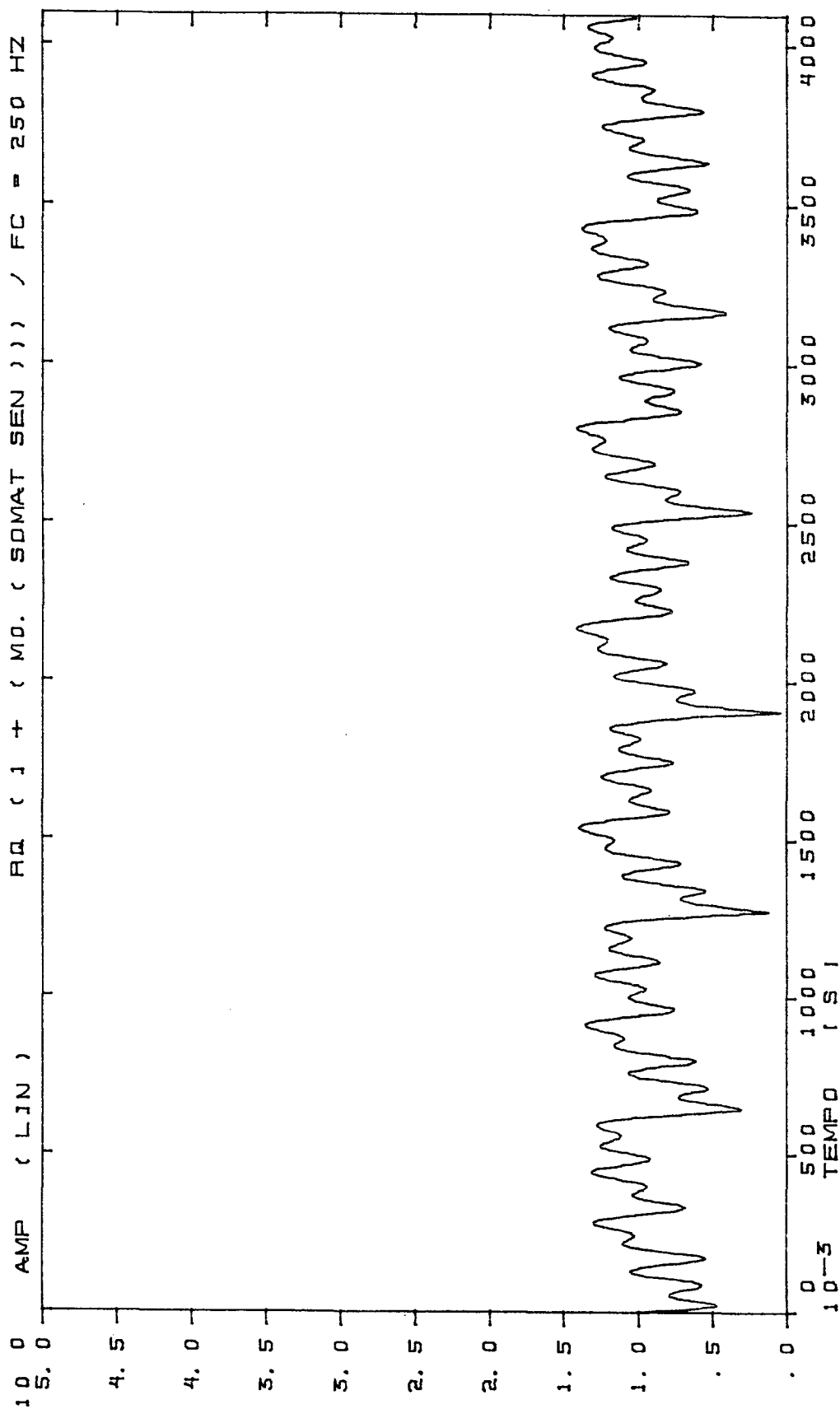


Figura 3.13 - Função moduladora da banda com frequência central de 250 Hz, resultado da obtenção da raiz quadrada do sinal apresentado na figura 3.9.

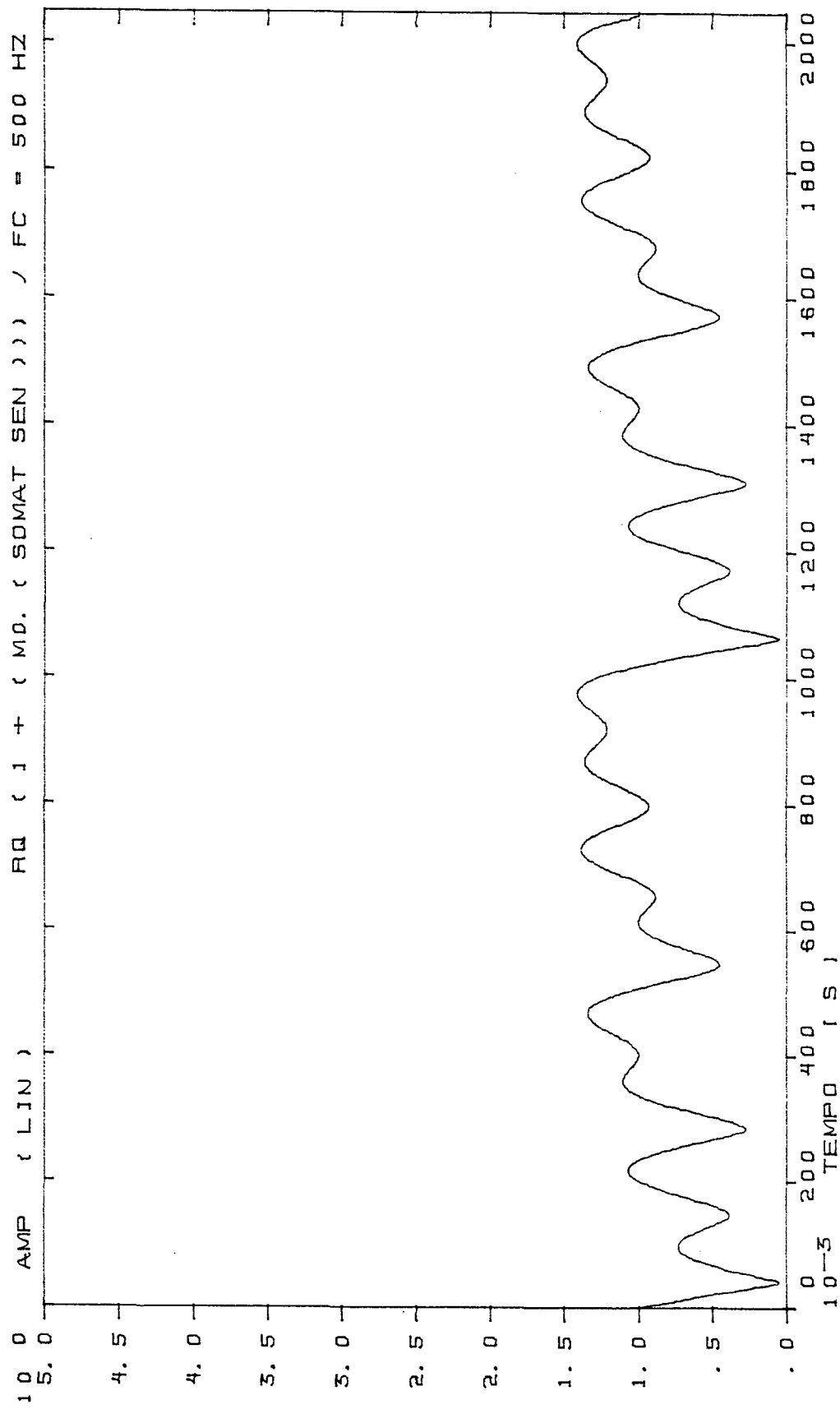


Figura 3.14 - Função moduladora da banda com frequência central de 250 Hz, resultado da obtenção da raiz quadrada do sinal apresentado na figura 3.10.

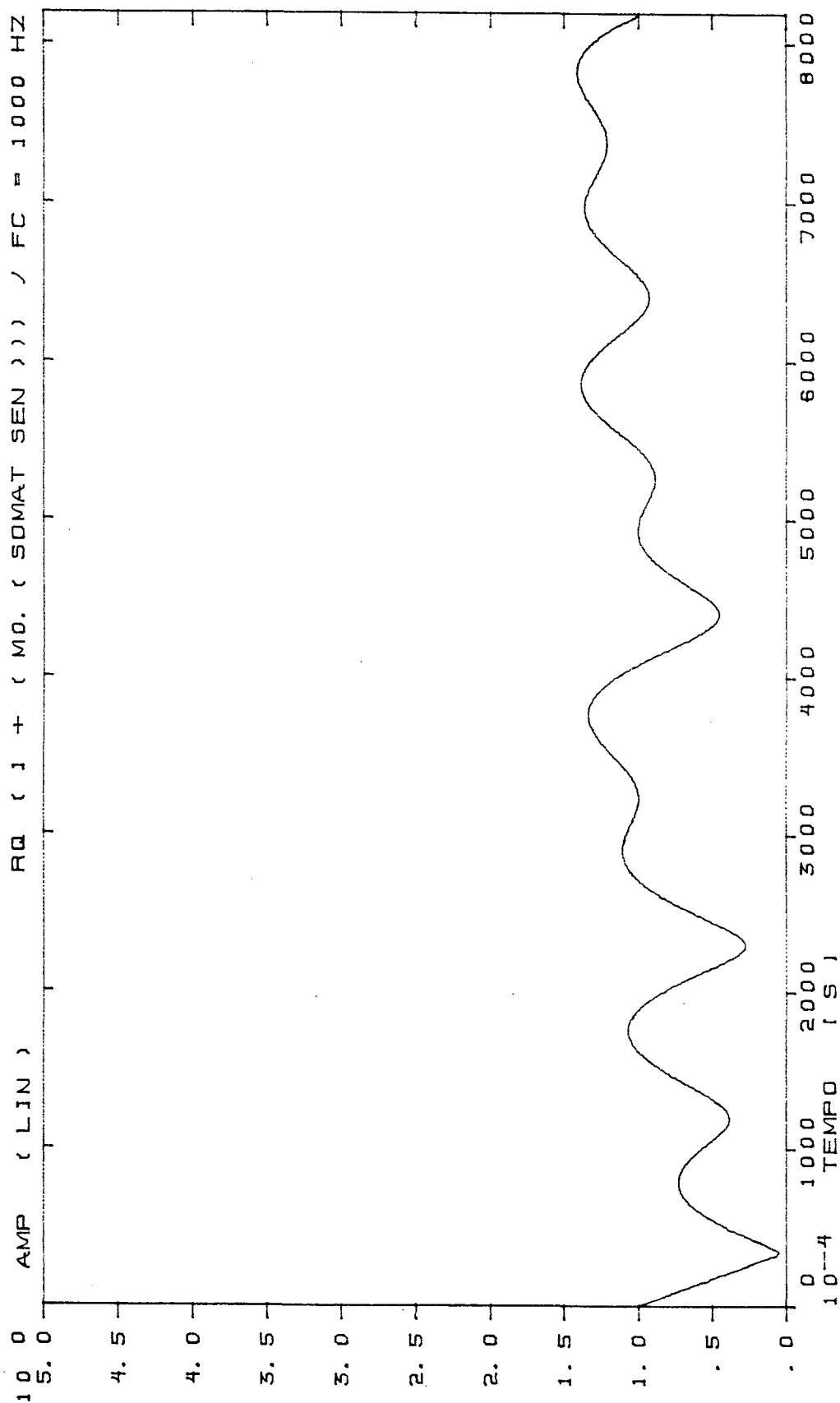


Figura 3.15 - Função moduladora da banda com frequência central de 250 Hz, resultado da obtenção da raiz quadrada do sinal apresentado na figura 3.11.

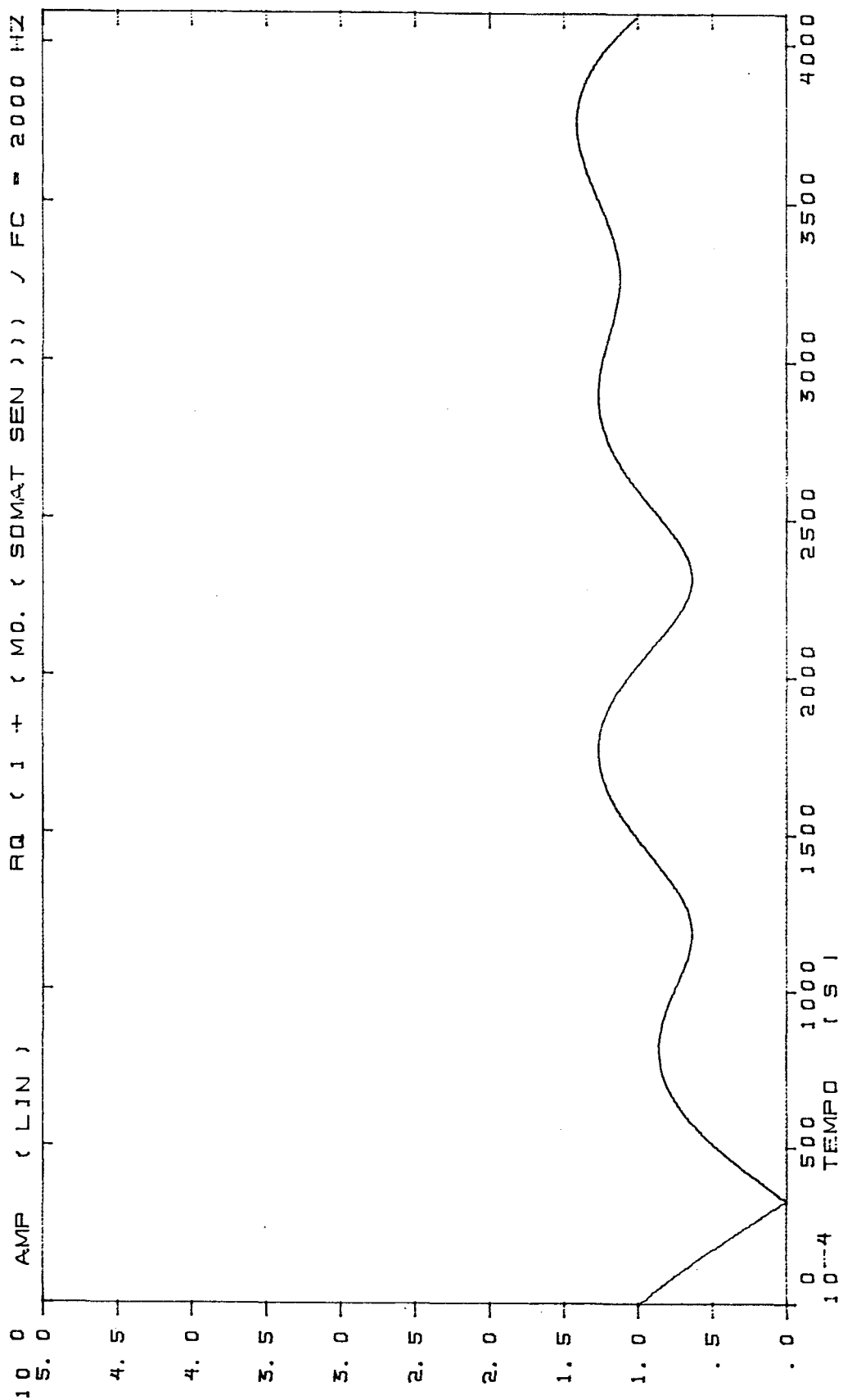


Figura 3.16 - Função moduladora da banda com frequência central de 250 Hz, resultado da obtenção da raiz quadrada do sinal apresentado na figura 3.12.



Tabela 3.2 - Valores das fm's geradas no analisador e pela B&amp;K

FREQUENCIA CENTRAL 1/3 OIT	(b <sub>n</sub> Δf) = FREQ. MODULAÇÃO GERADAS [Hz]				DIFERENÇA EM FREQ. [Hz]	DIFERENÇA PERCENTUAL [%]
	250 [Hz]	500 [Hz]	1k [Hz]	2k [Hz]		
1,00		0,9766			0,02	2,34
1,25			1,221		0,03	2,32
1,60	1,709				0,11	6,81
2,00		1,954			0,05	2,30
2,50			2,442	2,442	0,06	2,30
3,15	3,174				0,02	0,76
4,00		3,907			0,09	2,32
5,00			4,883	4,883	0,12	2,34
6,30	6,348				0,05	0,76
8,00		7,813			0,19	2,34
10,0			9,766	9,766	0,23	2,34
12,5	12,70				0,20	1,60
DIFERENÇAS MÉDIAS					0,097	2,328

BRÜEL & KJÆR									
FREQ. ADOPTADA [Hz]	0,7	1,0	1,4	2,0	2,8	4,0	5,6	8,0	11,20
FREQ. GERADA [Hz]	0,73	1,02	1,45	2,03	2,90	4,07	5,81	8,14	11,63
DIF. EM FREQ. [Hz]	0,03	0,02	0,05	0,03	0,10	0,07	0,21	0,14	0,43
DIF. PERCENTUAL [%]	4,29	2,00	3,57	1,50	3,57	1,75	3,75	1,75	3,84
DIFERENÇAS MÉDIAS	EM FREQ. = 0,12 [Hz]				EM PERCENTUAL = 2,891 [%]				

Produzir os sinais do ruído branco filtrado, que serão os sinais portadores das funções de modulação, implicou a execução das seguintes etapas:

a) geração de ruído branco; como o analisador digital dispõe deste tipo de função já previamente programada, procedeu-se à sua execução;

b) aplicação da transformada discreta de Fourier nos sinais, levando-os ao domínio da frequência;

c) elaboração dos filtros das bandas de oitava, com frequências centrais de 250 Hz, 500 Hz, 1000 Hz e 2000 Hz, dentro das normas constantes na ANSI S1.11 [17] apresentados nas figuras 3.17 a 3.20. A figura 3.21 apresenta as curvas dos limites superior e inferior do filtro de 1/1 oitava da norma ANSI, juntamente com a curva do filtro projetado no analisador de frequências. A curva do filtro projetada é genérica a todas as bandas de oitava, pois o que se apresenta na figura é o caimento relativo em função da razão entre frequência e frequência central da banda de oitava. Os filtros são compostos em frequência somente por uma parte real, para que, quando multiplicados pelas funções complexas dos ruídos brancos, tenha-se com

$$R(t) = x + iy$$

$$S(t) = d$$

(3.5)

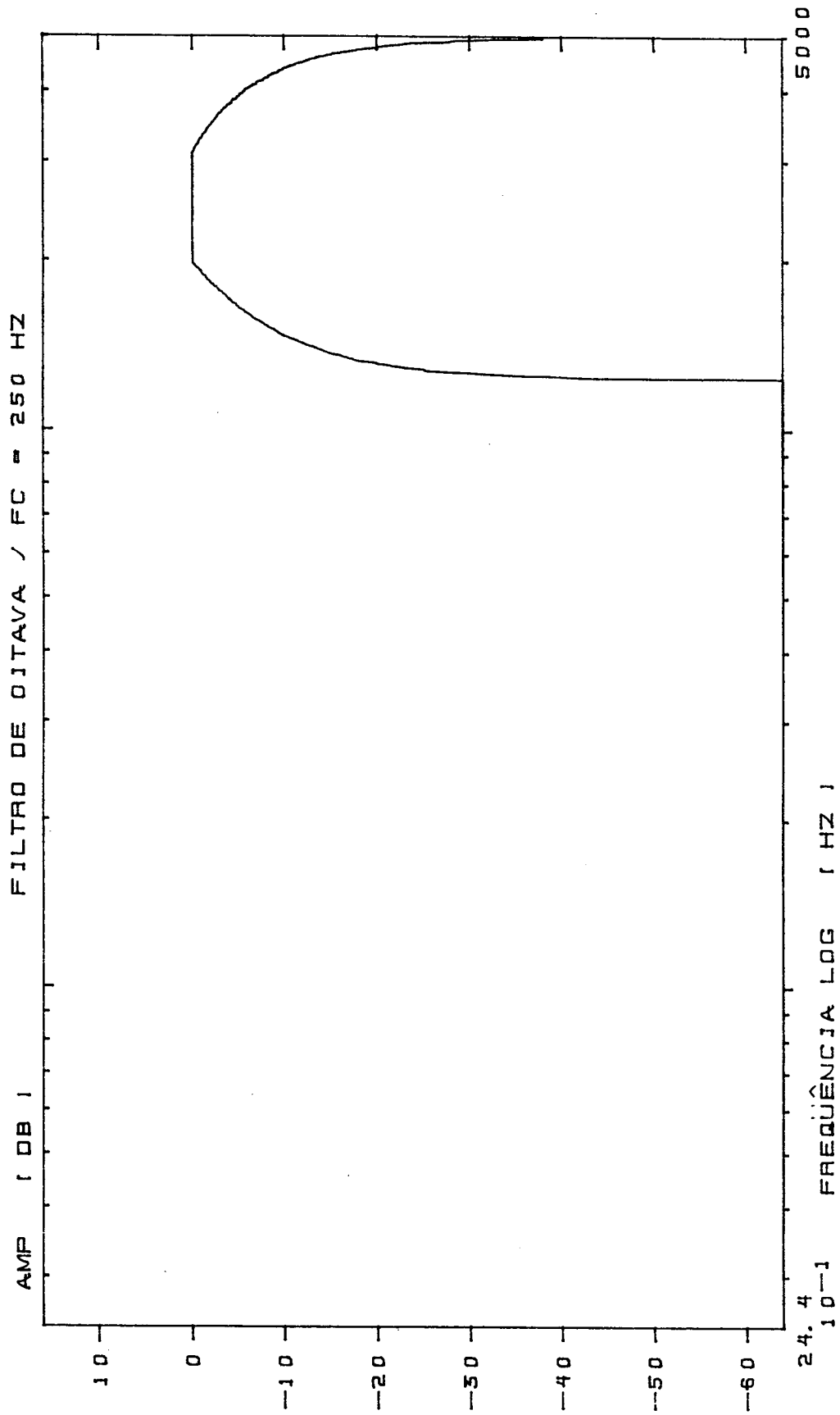


Figura 3.17 - Filtro digital de oitava, com frequência central de 250 Hz.

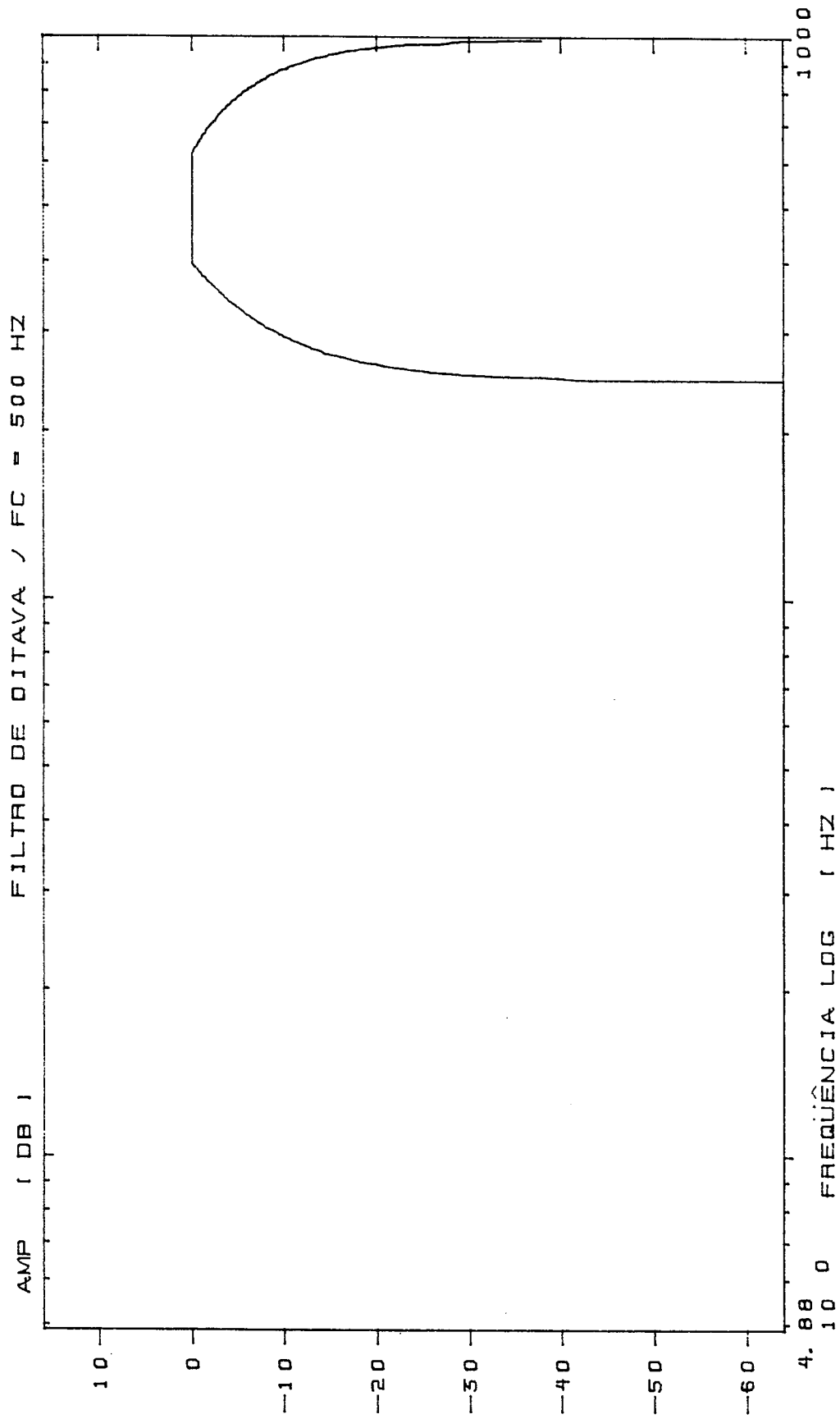


Figura 3.18 - Filtro digital de oitava, com frequência central de 500 Hz.

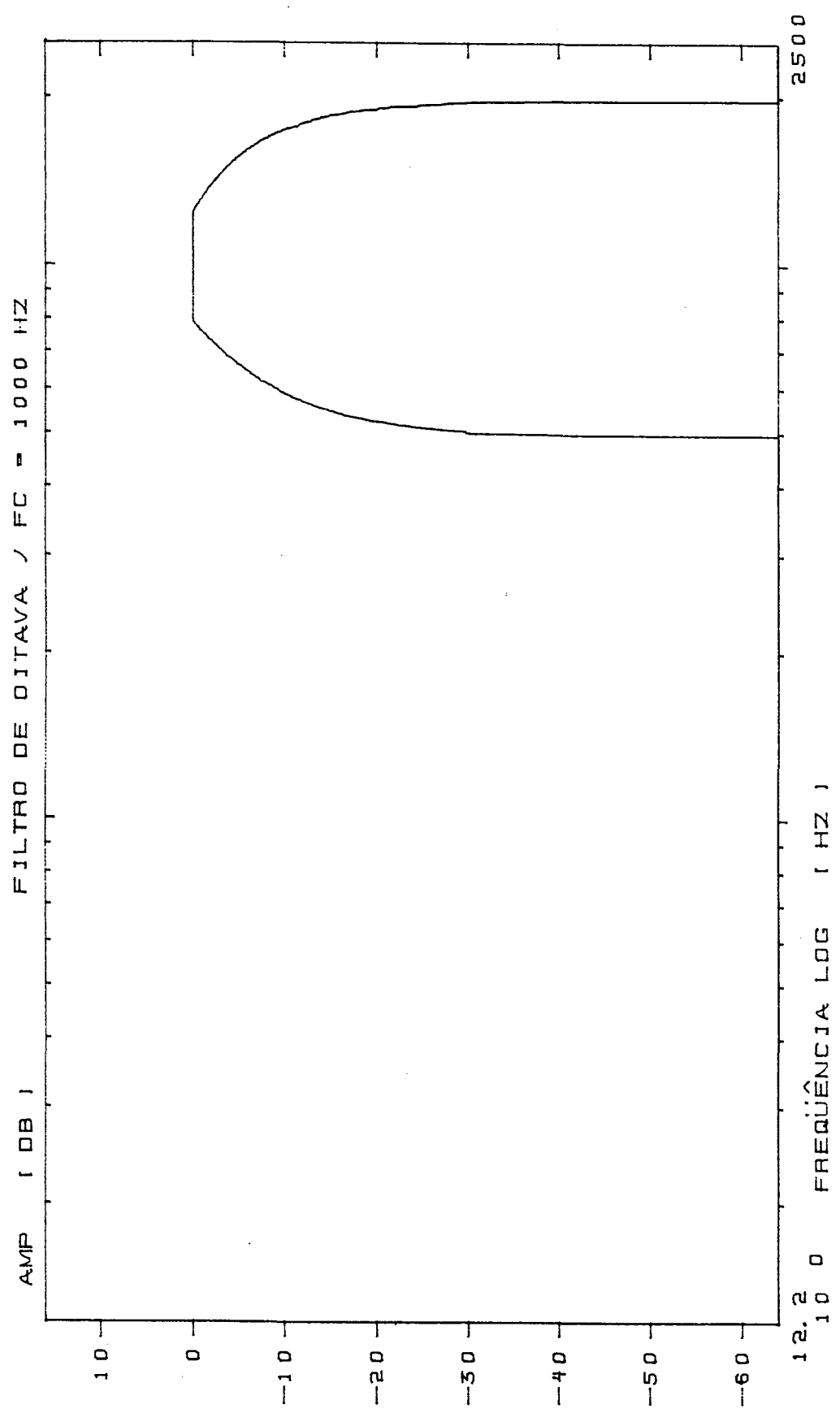


Figura 3.19 - Filtro digital de oitava, com frequência central de 1000 Hz.

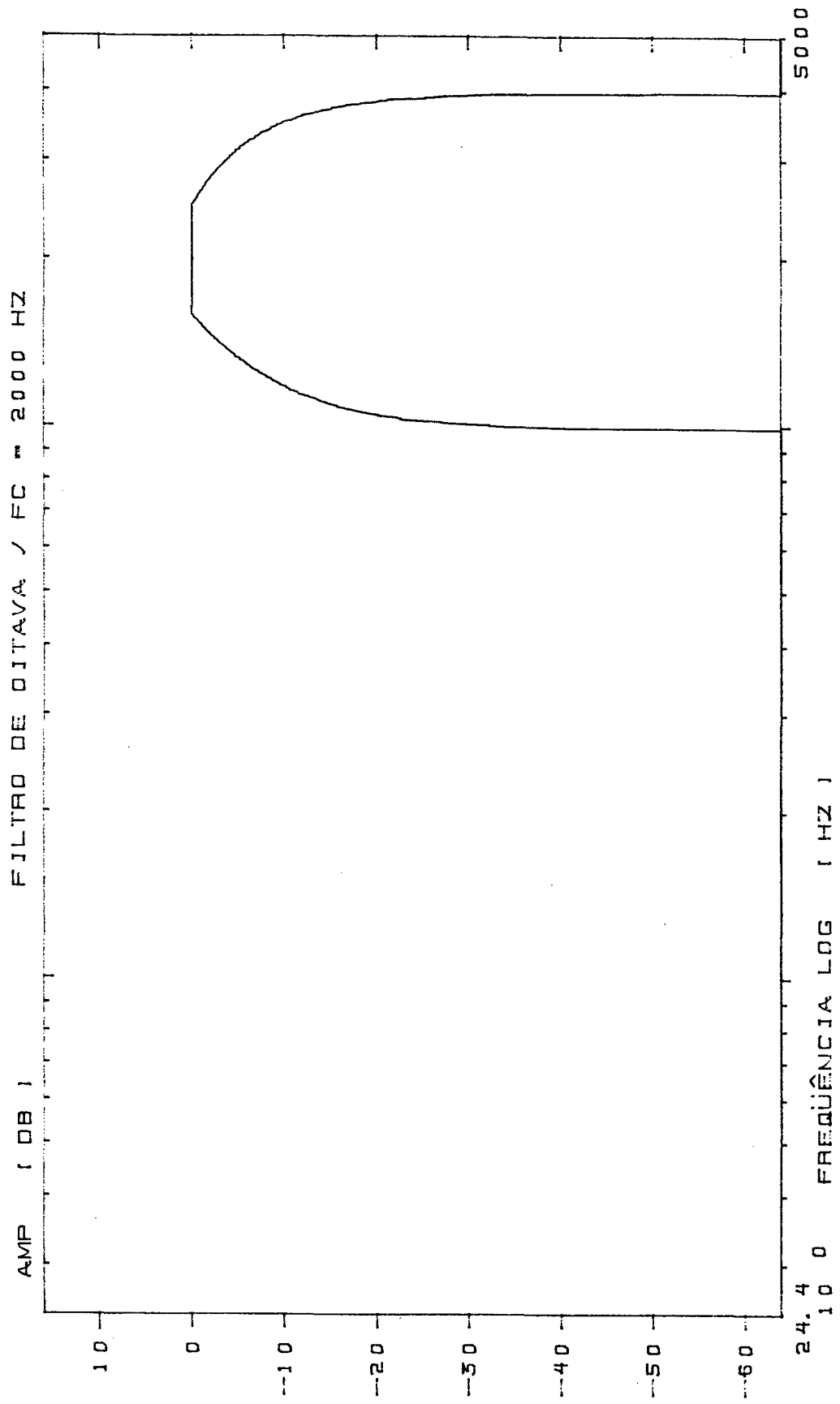
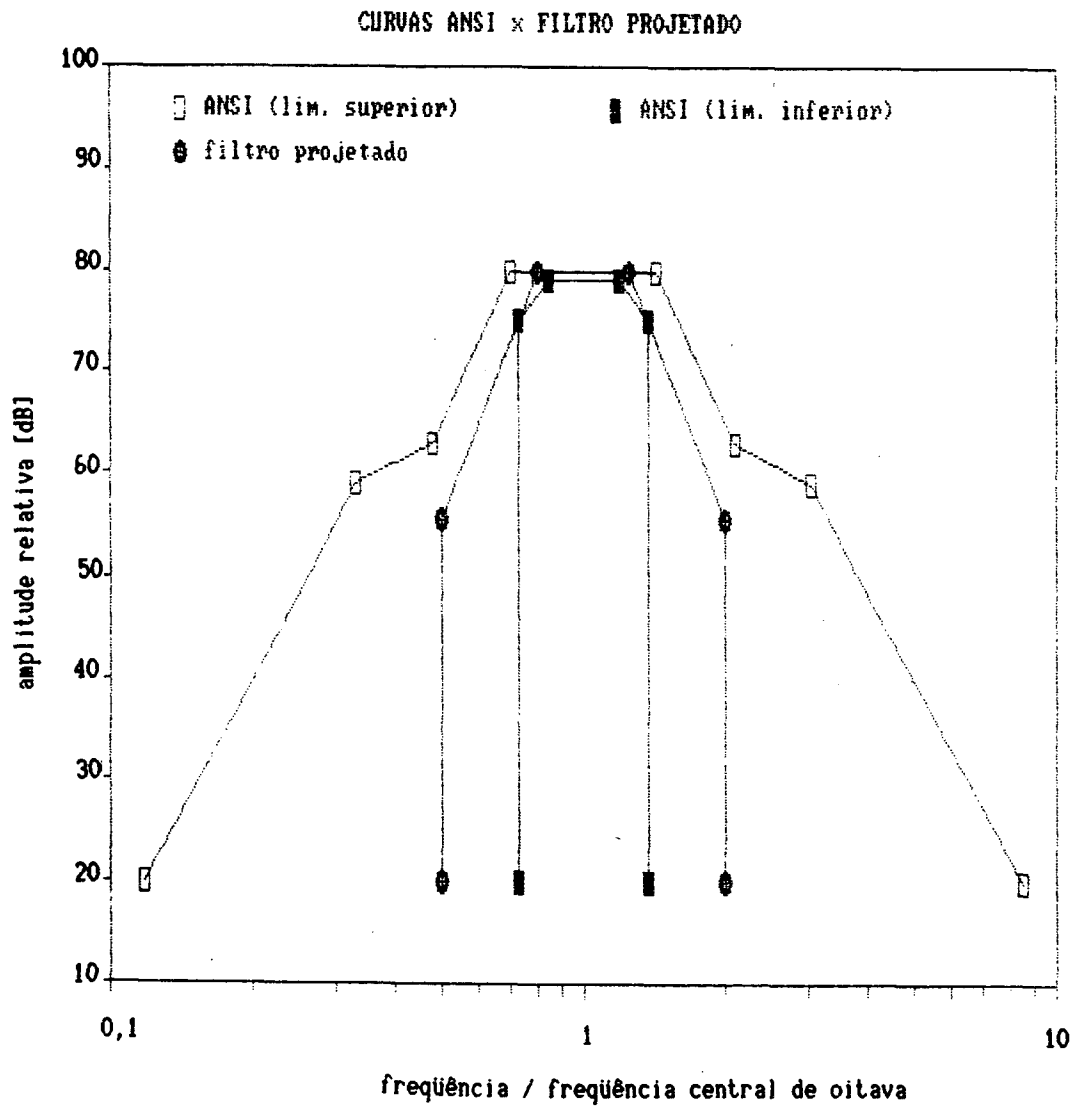


Figura 3.20 - Filtro digital de oitava, com frequência central de 2000 Hz.



**Figura 3.21** - Comparação das curvas de limite superior e inferior para filtros de oitava pela norma ANSI S1.11 com a curva do filtro projetado digitalmente no HP 5451C.

onde,

$R(t)$  = função da pressão sonora do ruído branco não filtrado

$x$  = parte real da função  $R(t)$

$y$  = parte imaginária da função  $R(t)$

$S(t)$  = função que rege a curva do filtro de oitava

$d$  = parte real da função de  $S(t)$

o resultado de acordo com

$$R(t) \cdot S(t) = x_d + i y_d \quad (3.6)$$

$$P_b(t) = x_d + i y_d$$

onde  $P_b(t)$  é a pressão sonora do ruído branco filtrado;

d) filtragem dos sinais de ruído branco, no domínio da frequência, obtendo-se os resultados ilustrados nas figuras 3.22 a 3.25;

e) conversão dos sinais de ruído branco filtrado, para o domínio do tempo, apresentados nas figuras 3.26 a 3.29;

f) obtenção das 4 bandas de oitava do sinal de teste, como resultado do produto dos sinais obtidos no item e pelas funções moduladoras já geradas na primeira etapa. As figuras 3.30 a 3.33 apresentam as 4 componentes finais do sinal de teste, que possuem períodos iguais a: 4,1" (250 Hz), 1,02" (500 Hz), 0,82" (1 kHz) e 0,41" (2 kHz).



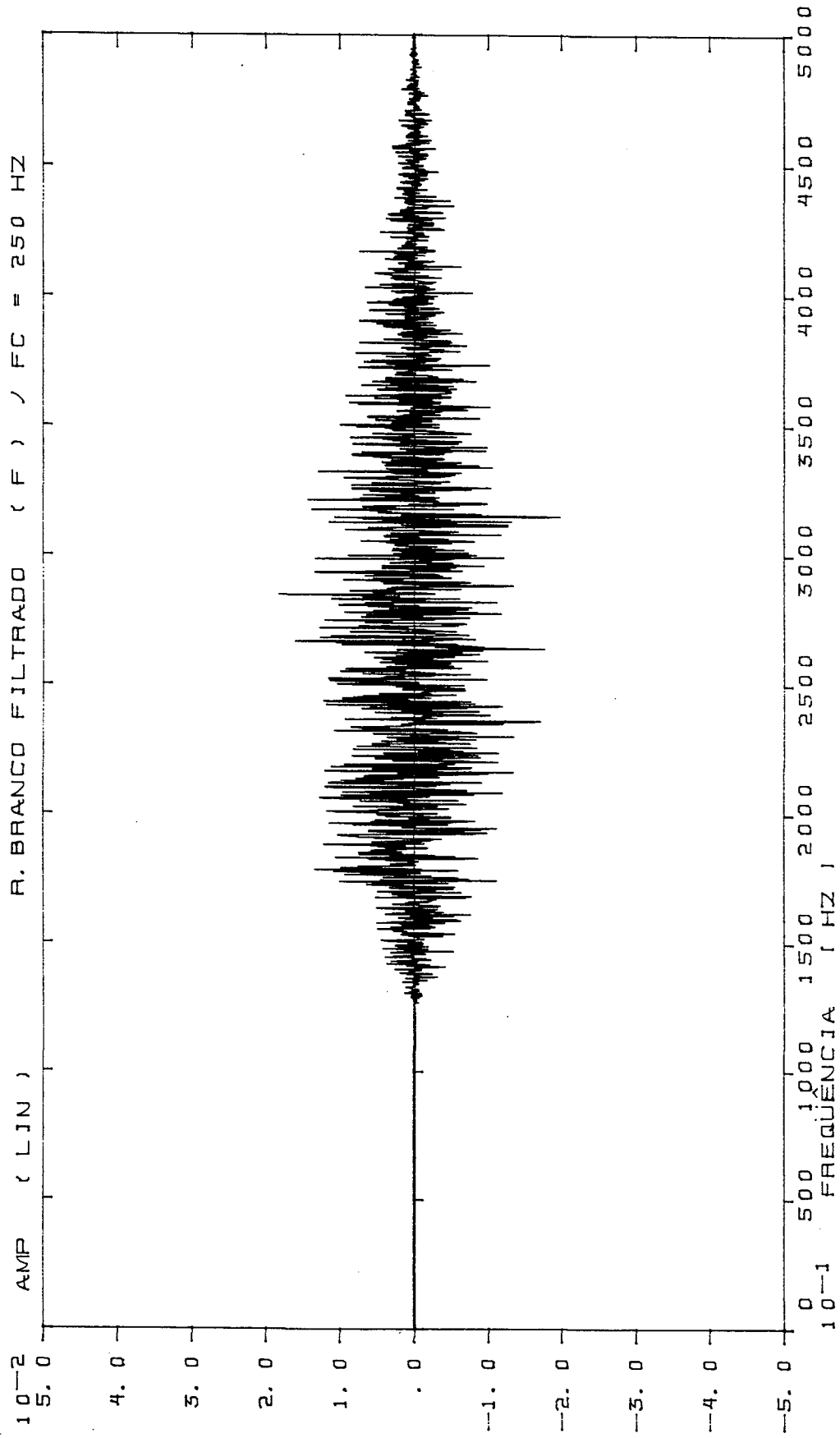


Figura 3.22 - Ruído branco filtrado em banda de oitava, com frequência central de 250 Hz, no domínio da frequência.

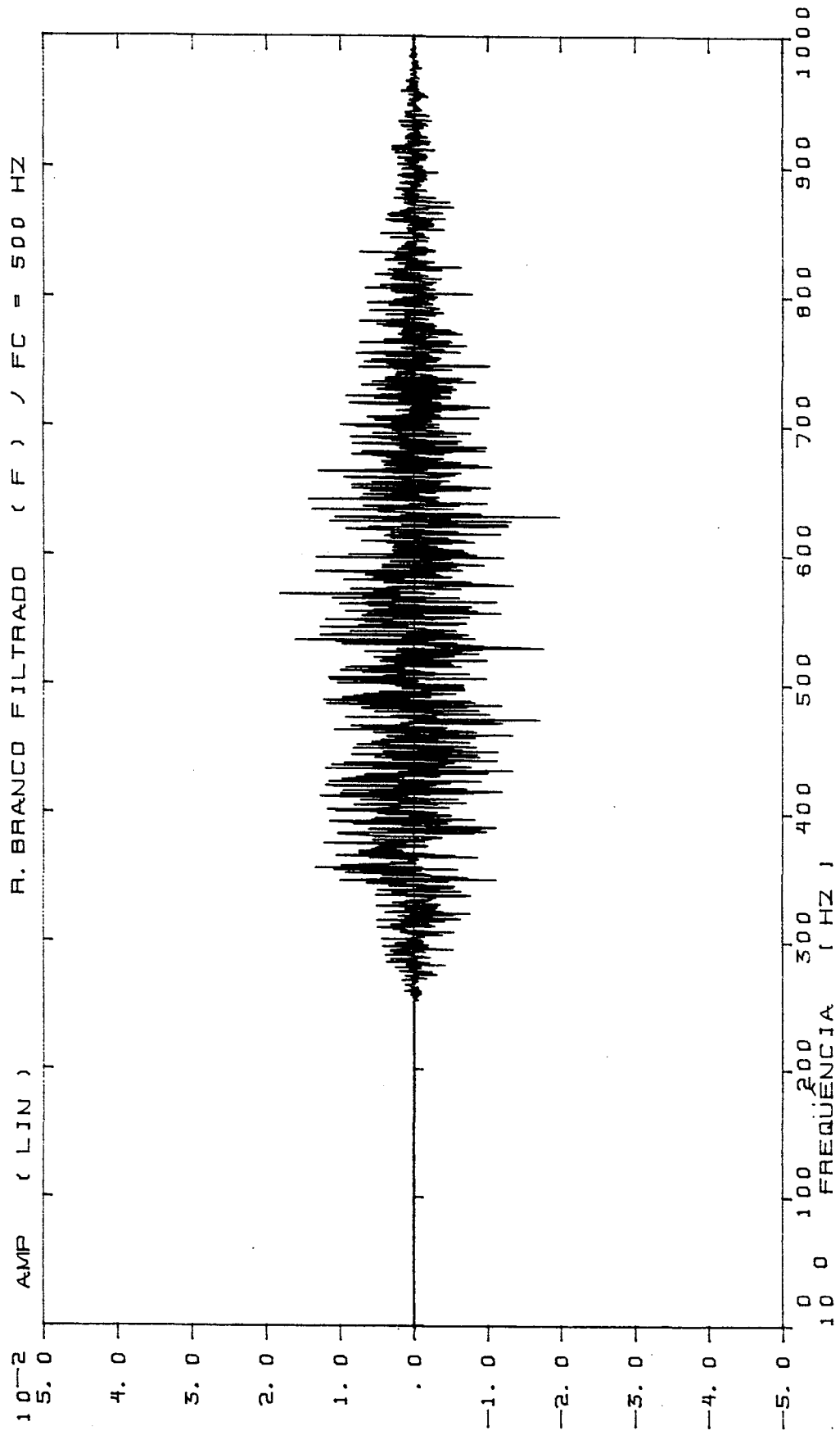


Figura 3.23 - Ruído branco filtrado em banda de oitava, com frequência central de 500 Hz, no domínio da frequência.

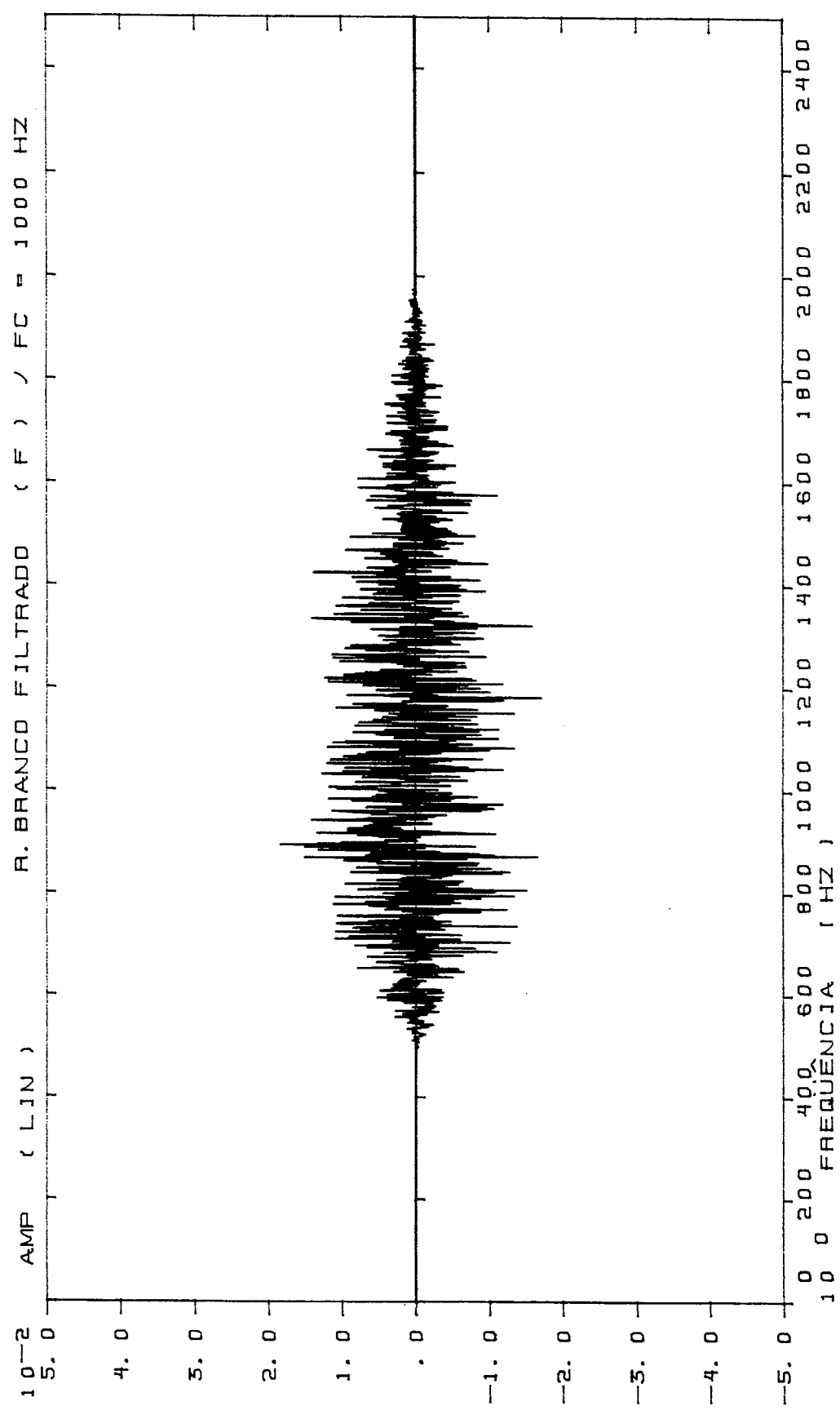


Figura 3.24 - Ruído branco filtrado em banda de oitava, com frequência central de 1000 Hz, no domínio da frequência.

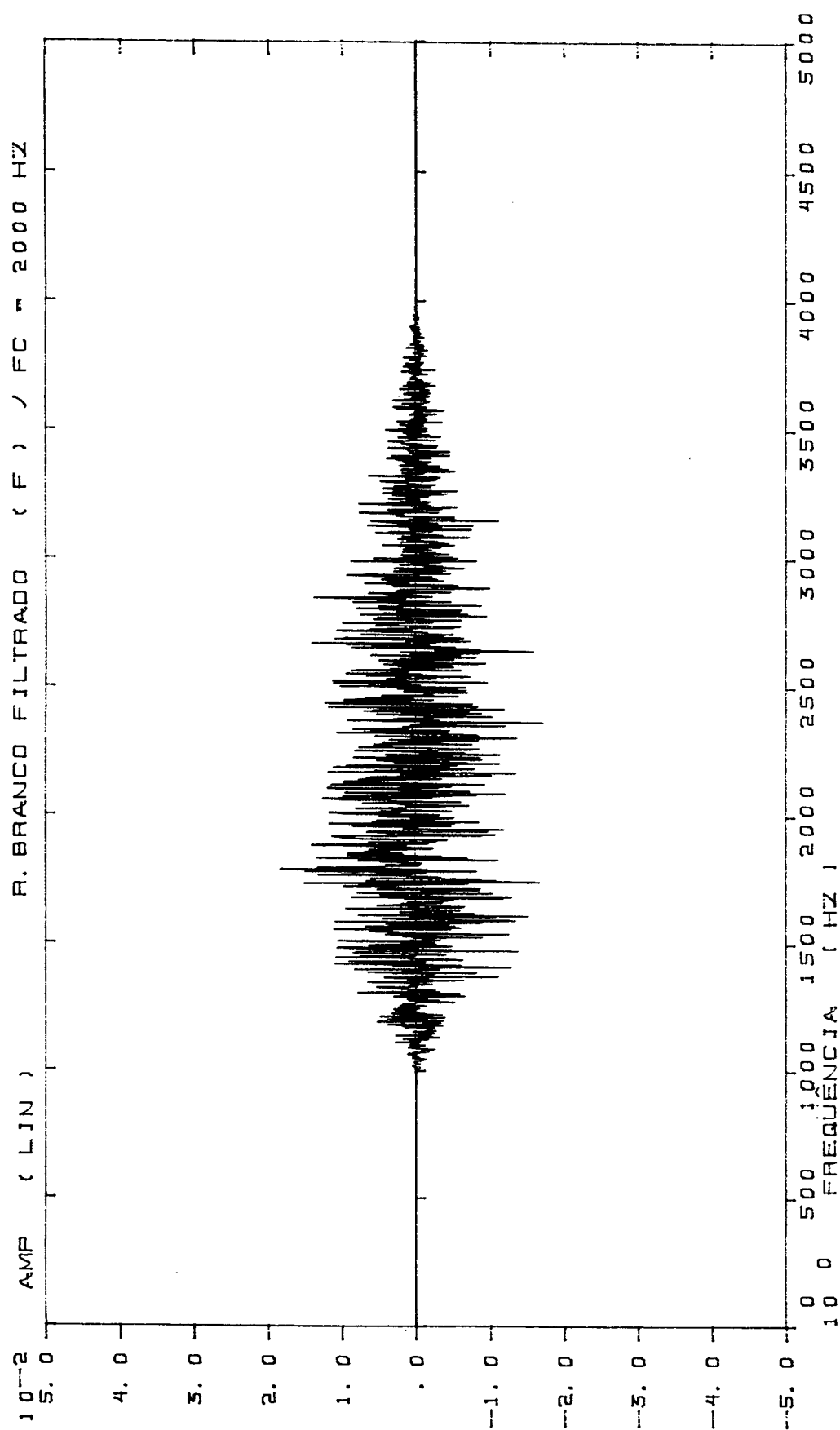
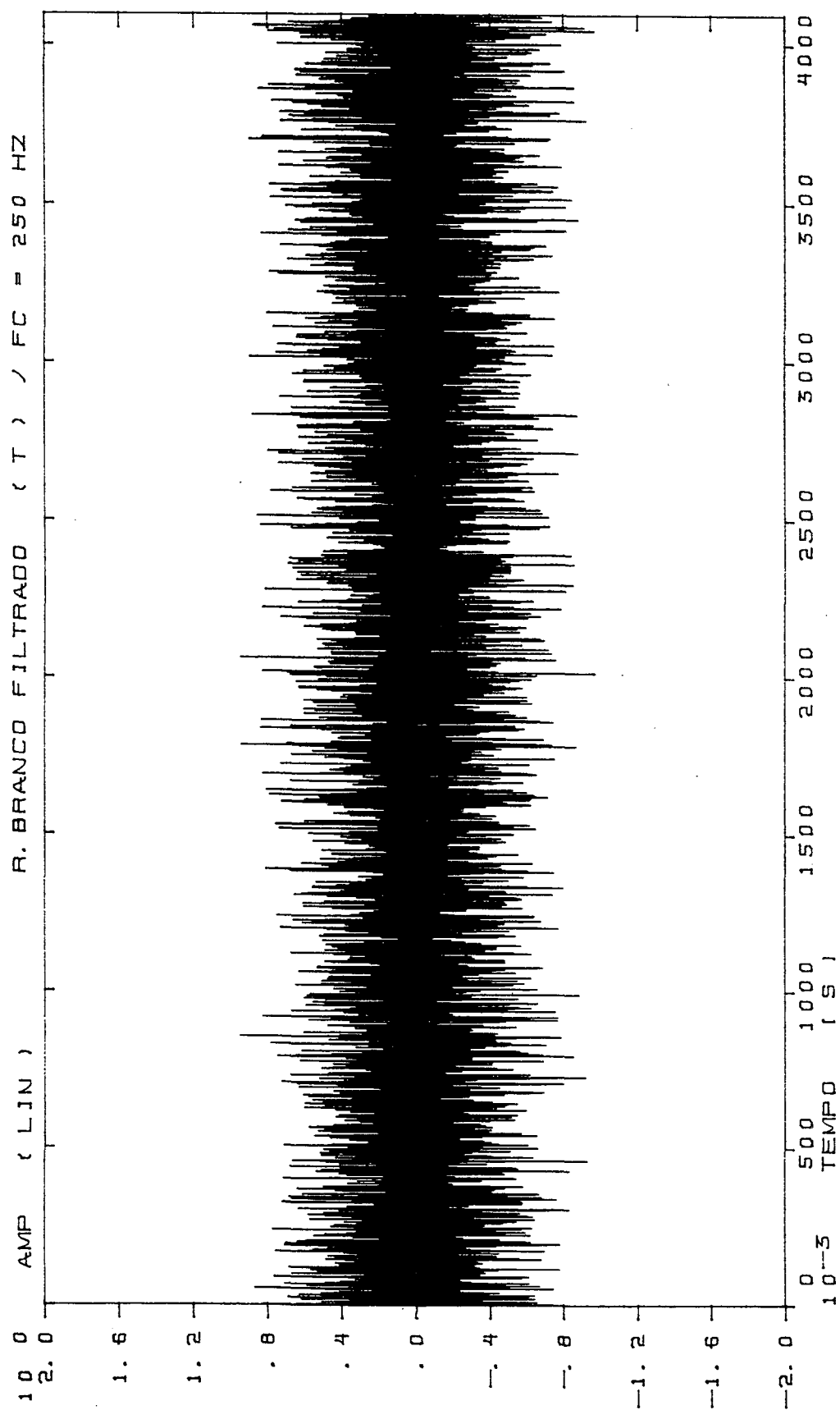
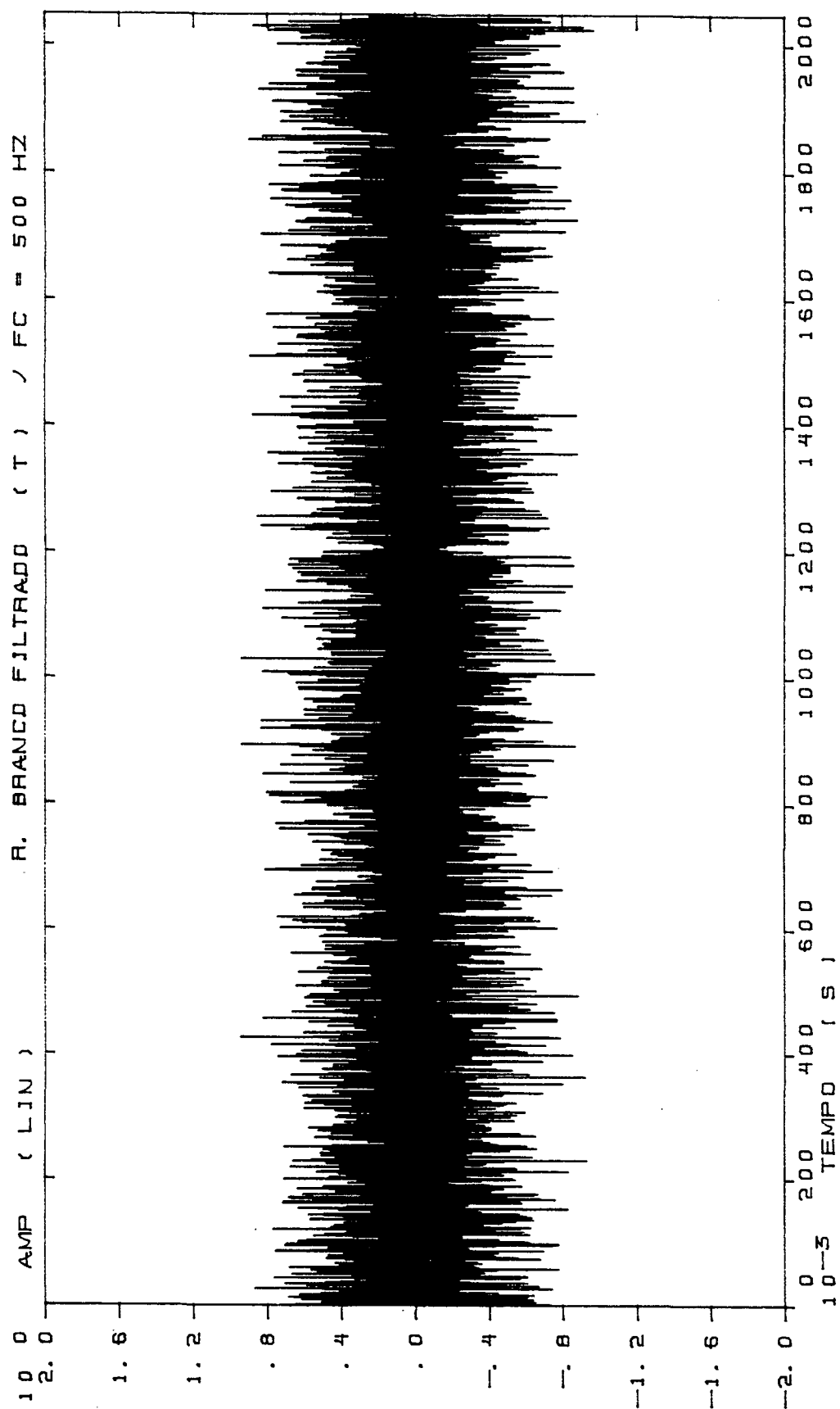


Figura 3.25 - Ruído branco filtrado em banda de oitava, com frequência central de 2000 Hz, no domínio da frequência.



**Figura 3.26** - Ruído branco filtrado em banda de oitava, com frequência central de 250 Hz, no domínio do tempo, resultado da transformada de Fourier do sinal apresentado na figura 3.22.



**Figura 3.27** - Ruído branco filtrado em banda de oitava, com frequência central de 500 Hz, no domínio do tempo, resultado da transformada de Fourier do sinal apresentado na figura 3.23.

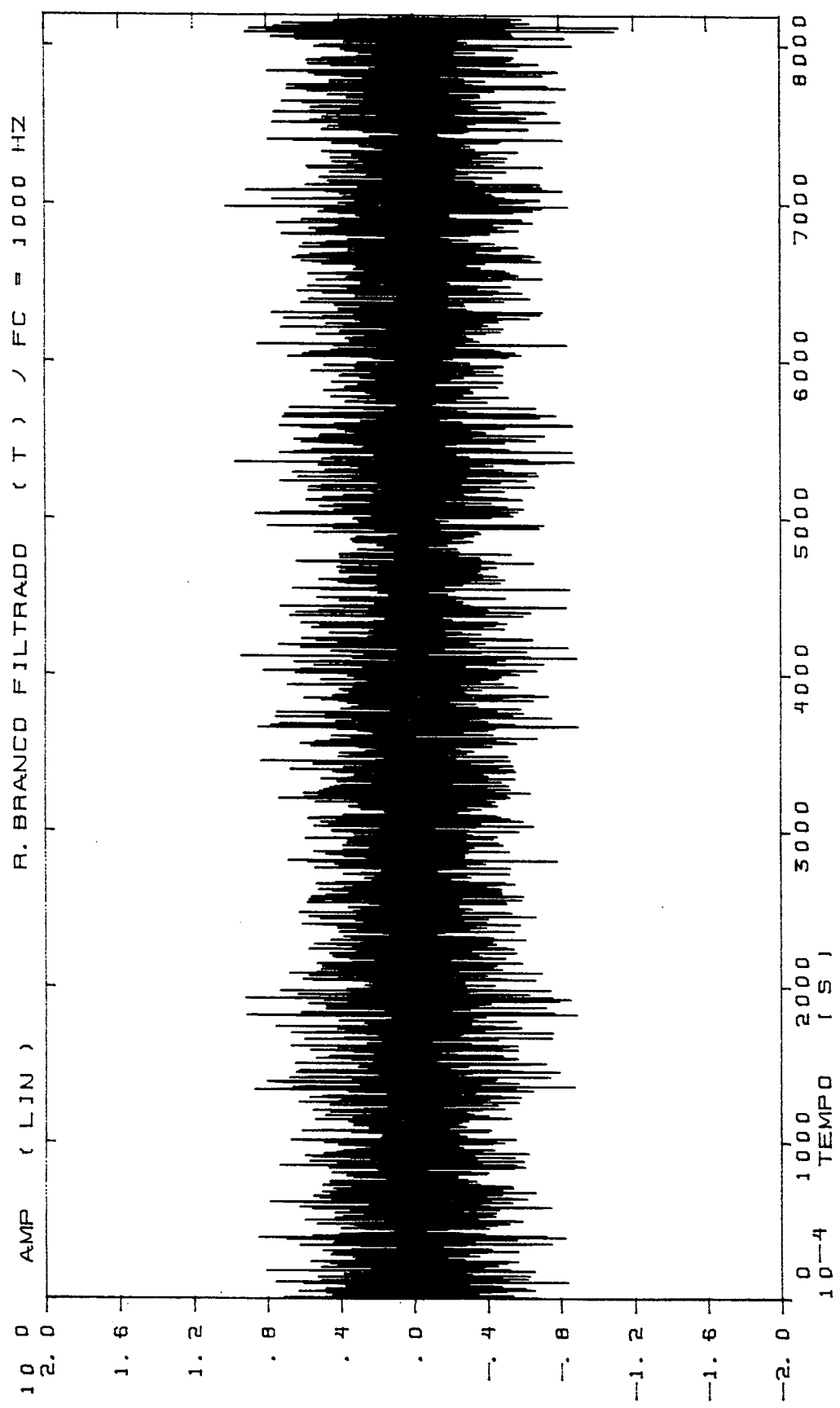


Figura 3.28 - Ruído branco filtrado em banda de oitava, com frequência central de 1000 Hz, no domínio do tempo, resultado da transformada de Fourier do sinal apresentado na figura 3.24.

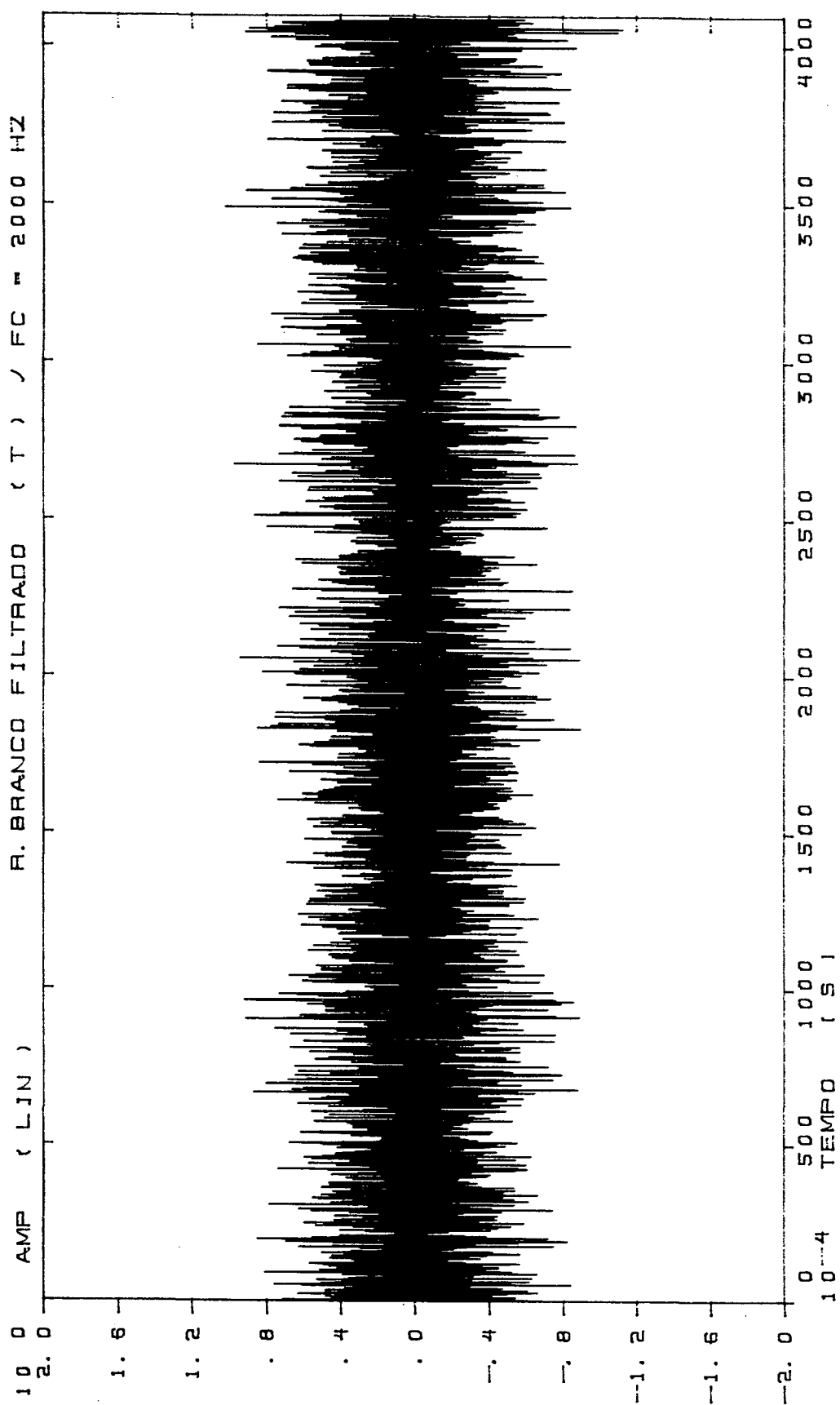


Figura 3.29 - Ruído branco filtrado em banda de oitava, com frequência central de 2000 Hz, no domínio do tempo, resultado da transformada de Fourier do sinal apresentado na figura 3.25.



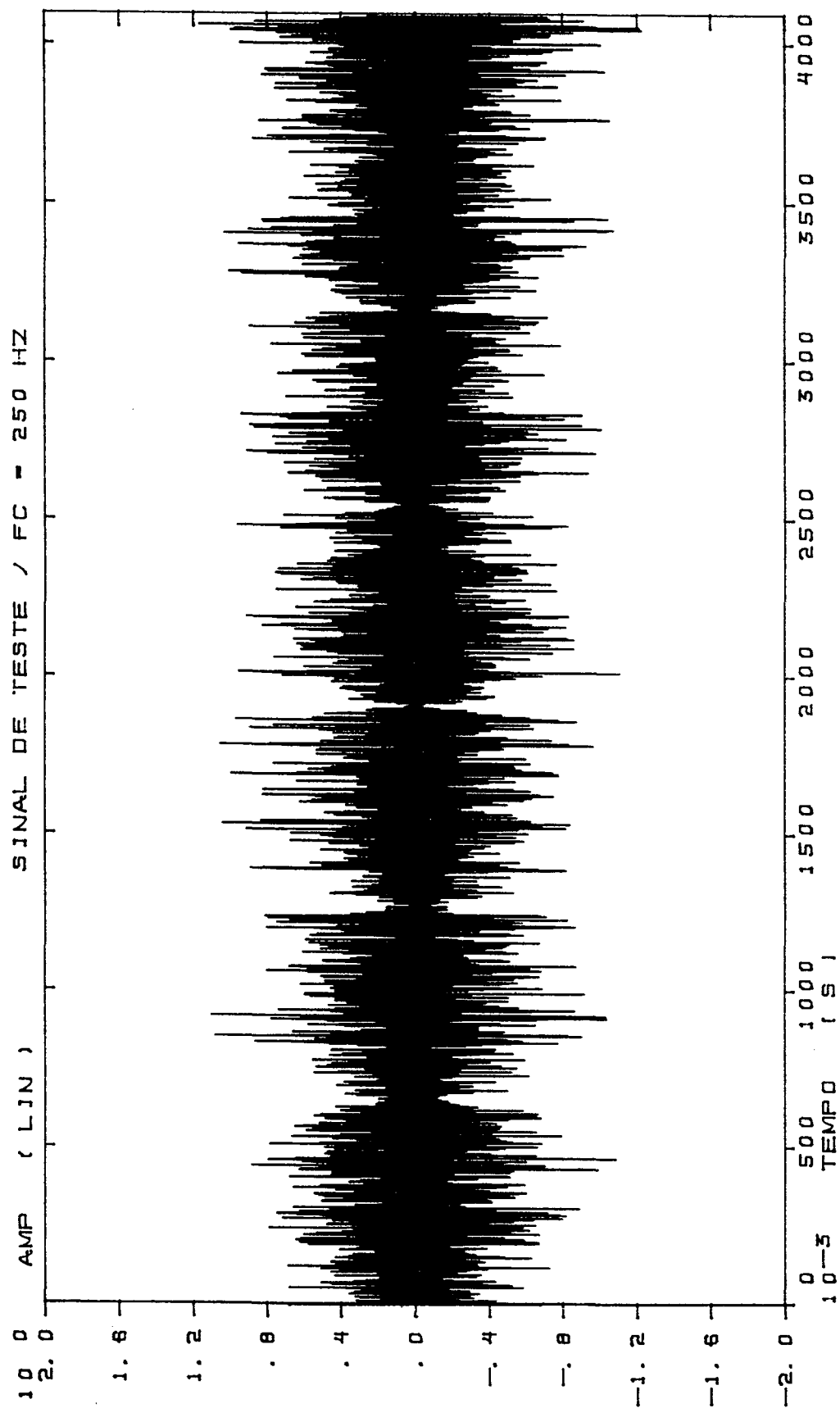


Figura 3.30 - Sinal de teste para a banda de oitava com frequência central de 250 Hz, resultado do produto dos sinais apresentados nas figuras 3.13 e 3.26.

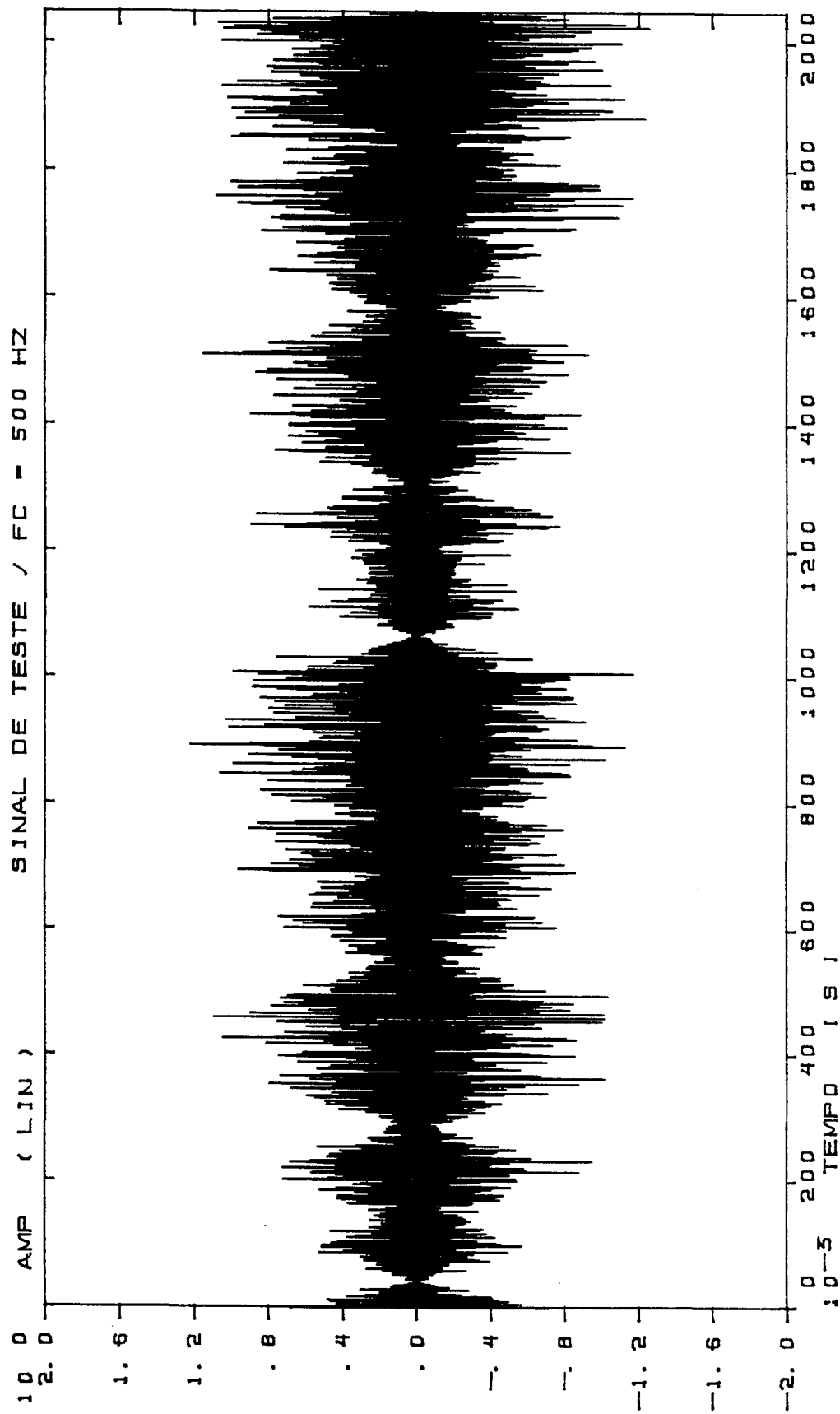
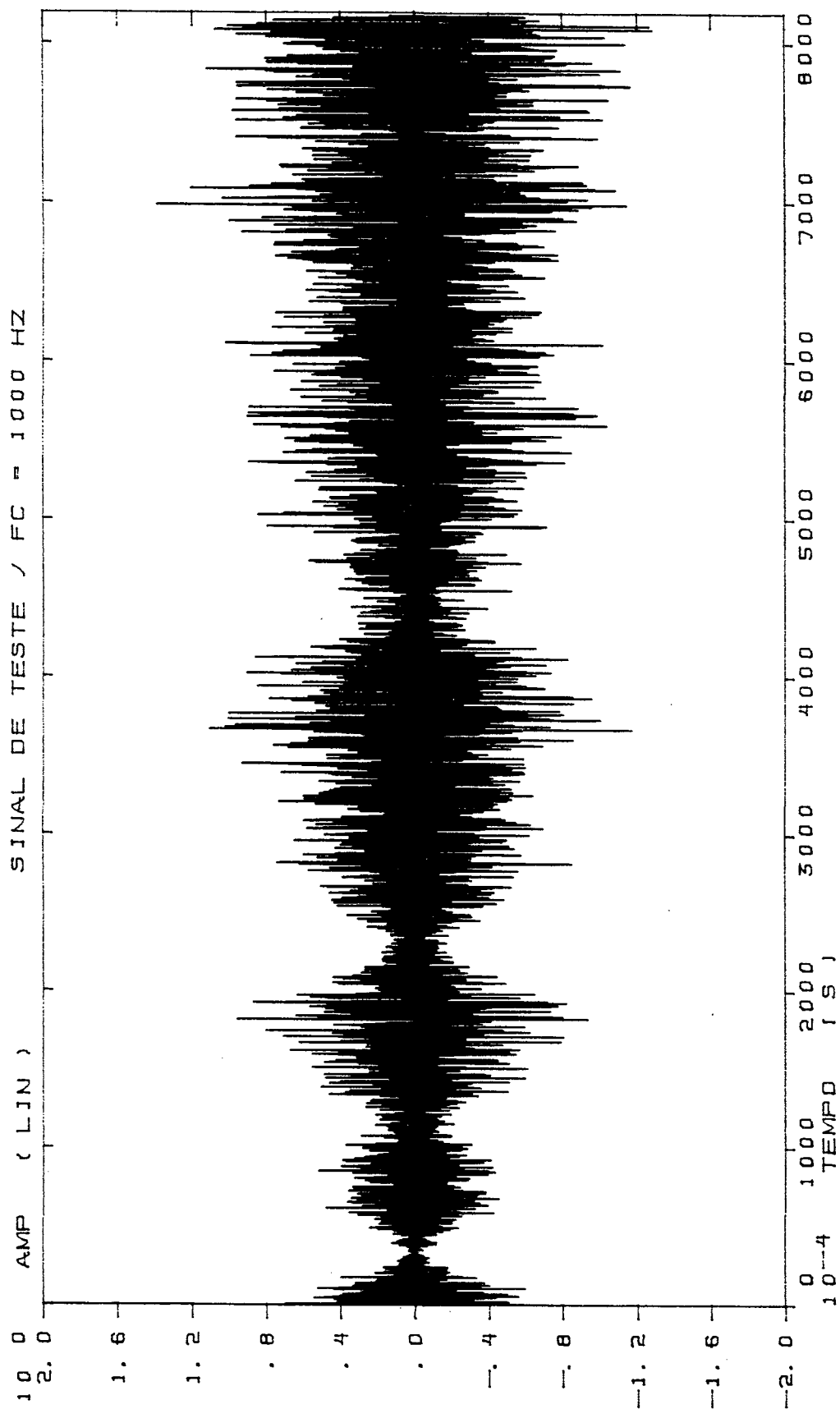


Figura 3.31 - Sinal de teste para a banda de oitava com frequência central de 500 Hz, resultado do produto dos sinais apresentados nas figuras 3.14 e 3.27.



**Figura 3.32** - Sinal de teste para a banda de oitava com frequência central de 1000 Hz, resultado do produto dos sinais apresentados nas figuras 3.15 e 3.28.

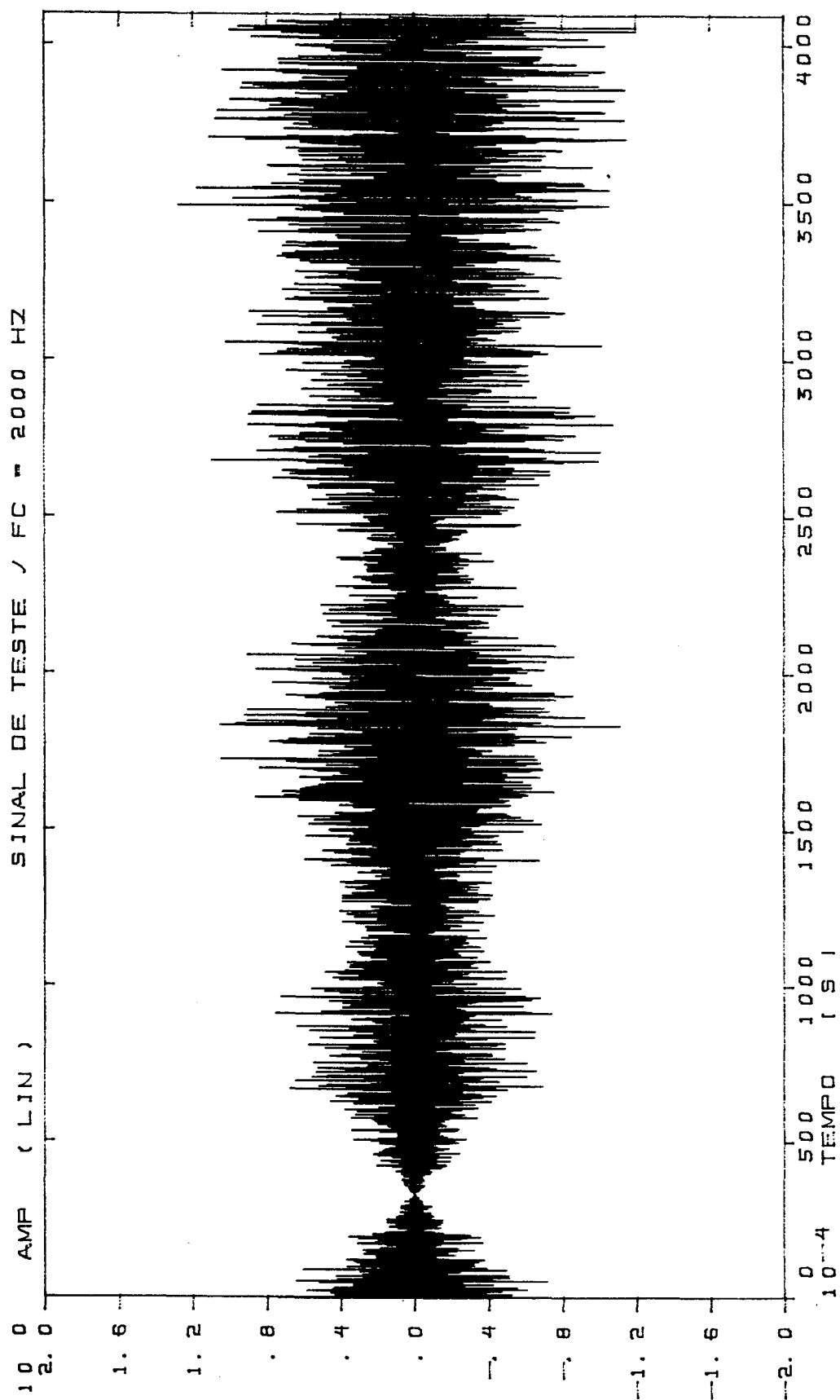


Figura 3.33 - Sinal de teste para a banda de oitava com frequência central de 2000 Hz, resultado do produto dos sinais apresentados nas figuras 3.16 e 3.29.

g) gravação das bandas de oitava do sinal de teste, separadamente, em um gravador Brüel & Kjaer, modelo 7003.

Para a visão completa do procedimento adotado, a ilustração 3.34 apresenta, de modo esquemático, todo o processo de geração do sinal de teste, utilizando, como exemplo, a banda de oitava com frequência central de 500 Hz.

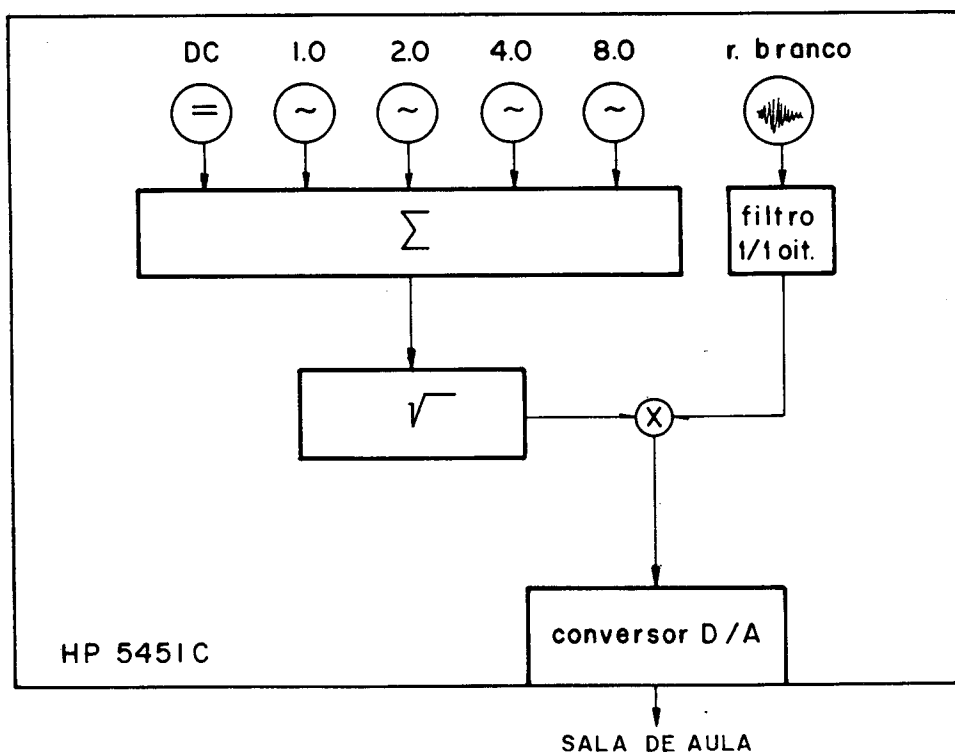


Figura 3.34 - Esquema de composição do sinal de teste, utilizando, como exemplo, a banda de oitava com  $F_c$  igual 500 Hz.

As quatro bandas de oitava que compõem o sinal de teste não serão aplicadas simultaneamente, posto que os parâmetros de utilização do analisador são diferentes para cada

banda, inviabilizando a fusão dos quatro componentes do sinal de teste.

Na excitação acústica das salas testadas, os níveis de pressão sonora foram calibrados diferentemente para cada banda, sempre a um metro da fonte, para que correspondessem à composição normalmente encontrada na fala, conforme apresentado no capítulo 2, figura 2.2a. Considerando-se a banda com frequência central de 500 Hz como referência, a ponderação aplicada foi:

- banda de 250 Hz = + 1,5 dB
- banda de 1k Hz = - 5,0 dB
- banda de 2k Hz = - 9,0 dB

O nível de pressão sonora a ser adotado para os ensaios de um modo geral, deve ser obtido de acordo com o seguinte procedimento:

- Especificar o Nível Sonoro Contínuo Equivalente em dB(A),  $Leq(A)$ , de uma amostra de fala representativa da atividade da sala. Este será o valor a ser alcançado para o nível de excitação do sinal de teste, em valor RMS, integrado sobre um longo intervalo de tempo, tomando-se novamente a banda de oitava com  $F_c = 500$  Hz como referência. Os sinais de excitação das outras três bandas, em seus valores RMS, seguem a ponderação anteriormente descrita em relação ao  $Leq(A)$  obtido.

### 3.2 QUALIFICAÇÃO DO SINAL DE TESTE E DO SISTEMA DE MEDIÇÃO

Se considerássemos que o sinal de teste passa por um sistema ideal, sem sofrer deterioração por ruído de fundo nem por reverberação, teríamos, como resultado para o teste de avaliação apresentado neste estudo, o valor máximo, a unidade.

A demonstração analítica deste valor é dada pela equação que rege o fator redução de modulação,  $m$  (ver apêndice A):

$$m = \frac{1}{\sqrt{1 + (2\pi f_m T_r / 13,8)^2}} \cdot \frac{1}{(1 + 10^{-(S/R)/10})} \quad (3.7)$$

onde,

$f_m$  = frequência de modulação

$T_r$  = tempo de reverberação

$(S/R)$  = razão sinal/ruído

No limite, quando  $T_r$  tende a zero e  $(S/N)$  tende a infinito, o valor de  $m$  tende a um.

Para a simulação desta situação, efetuou-se o processamento do sinal de teste como se este fosse a resposta captada. Os valores obtidos para as quatro bandas foi o máximo, não sendo necessário repetir o teste, pois os sinais encontravam-se digitalizados e armazenados na memória em disco fixo do analisador.

Qualificado o sinal de teste, verificou-se então o sistema de captação e processamento do sinal de resposta. Para isso fez-se com que o sinal de voltagem da função do sinal de teste fosse gravado em fita e posteriormente captado pelo analisador, que o processou na forma do sinal de resposta. Com os resultados finais do cálculo, apresentados na tabela 3.3, juntamente com o teste de repetibilidade, expresso através dos valores médios  $\bar{x}$  e do desvio padrão  $s$ , o sistema apresenta-se parcialmente qualificado, já que não é possível simular a cadeia de medição em seu todo sem fazer com que o sinal de resposta traga a influência do meio no qual se realiza. Tal procedimento só seria possível na ausência total de reverberação e de ruído de fundo, com o ensaio em câmara anecóica.

### 3.3 ANÁLISE DO SINAL DE RECEPÇÃO

Neste tópico são apresentados o sistema de medição do sinal de resposta, o processamento digital dos sinais que levam à obtenção dos espectros envelope de intensidade e o cálculo numérico para conversão dos valores em um índice característico da qualidade acústica da sala, sob o ponto de vista da inteligibilidade.

#### 3.3.1 Captação do Sinal

O sistema de medição foi planejado de modo a captar-se a resposta do ambiente, quando submetido ao sinal de teste,



TABELA 3.3 - Teste de repetibilidade do sistema

Nº MEDIÇÃO	VALOR PARCIAL POR FREQUÊNCIA PORTADORA				<u>IRIS</u>
	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	
1	0,99	1,00	1,00	1,00	1,00
2	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
3	0,99	1,00	1,00	1,00	1,00
4	0,99	1,00	1,00	1,00	1,00
5	0,99	1,00	1,00	1,00	1,00
6	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
7	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
8	0,99	1,00	1,00	1,00	1,00
$\bar{x}$	0,9950	1,00	1,00	1,00	1,00
$r$	0,2749	0,00	0,00	0,00	0,00

em cada uma das quatro bandas separadamente.

Para a montagem da cadeia de instrumentação utilizaram-se os seguintes equipamentos, todos de fabricação da Brüel & Kjaer, conforme ilustrado na figura 3.35:

Sistema de geração da excitação acústica

- fonte sonora, tipo 4241
- amplificador de potência, tipo 2706
- gravador magnético de sinais, tipo 7003

Sistema de captação da resposta

- microfone de meia polegada, tipo 4165
- medidor de nível sonoro, tipo 2209
- filtro de banda de oitava, tipo 1613

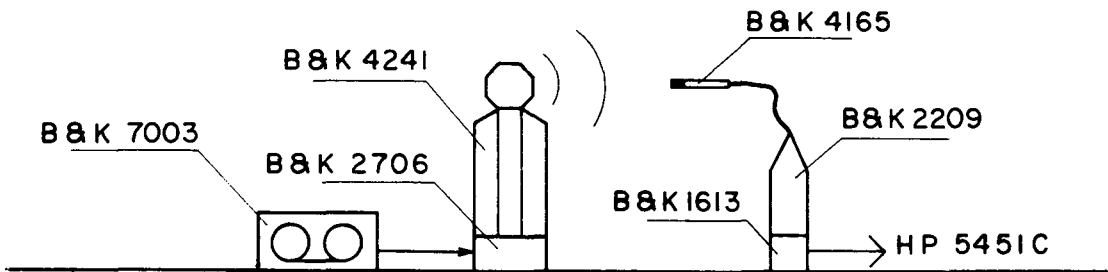


Figura 3.35 - Cadeia de instrumentação para aquisição do sinal de resposta.

Captado pelo medidor de nível de pressão sonora, o sinal de resposta de cada um dos pontos previamente selecionados passou por um filtro analógico de 1/1 oitava, centrado na banda do sinal de teste, e foi conduzido diretamente, através de um cabo de conexão, para o analisador digital.

Por ser o cabo de conexão demasiadamente longo, realizou-se um pequeno teste, para verificar-se a existência de decréscimo de amplitude do sinal em sua saída. Utilizando-se o comprimento inicial total, de 100 metros, foi aplicada uma voltagem de pequena amplitude, para que a relação sinal/ruído fosse baixa. Medida na outra extremidade, a amplitude da voltagem apresentou-se inalterada. Assegurada a manutenção do sinal na situação extrema, o cabo foi reduzido à dimensão

necessária.

Além da resposta da sala ao sinal de teste, foram também medidos os níveis de pressão sonora da excitação para cada ponto, o nível de ruído de fundo e o tempo de reverberação, que serão utilizados para a comparação com a previsão teórica do valor do fator de redução de modulação, a ser apresentado no capítulo 4.

### 3.3.2 Processamento Digital

Na aquisição do sinal de resposta pelo analisador, além de mantidos os parâmetros adotados quando da composição do sinal de teste, outro elemento necessita ser considerado.

Os sinais analógicos introduzidos no analisador HP 5451C passam por um filtro passa-baixo (filtro "anti-aliasing"), antes do processo de conversão analógico/digital. Os filtros foram sintonizados de modo que as frequências de corte fossem:

- 500 Hz para a banda de  $F_c = 250$  Hz
- 1250 Hz para a banda de  $F_c = 500$  Hz
- 2500 Hz para a banda de  $F_c = 1000$  Hz
- 5000 Hz para a banda de  $F_c = 2000$  Hz

A figura 3.36 ilustra, através da superposição de curvas, que o sinal, quando filtrado analogicamente, não perderá

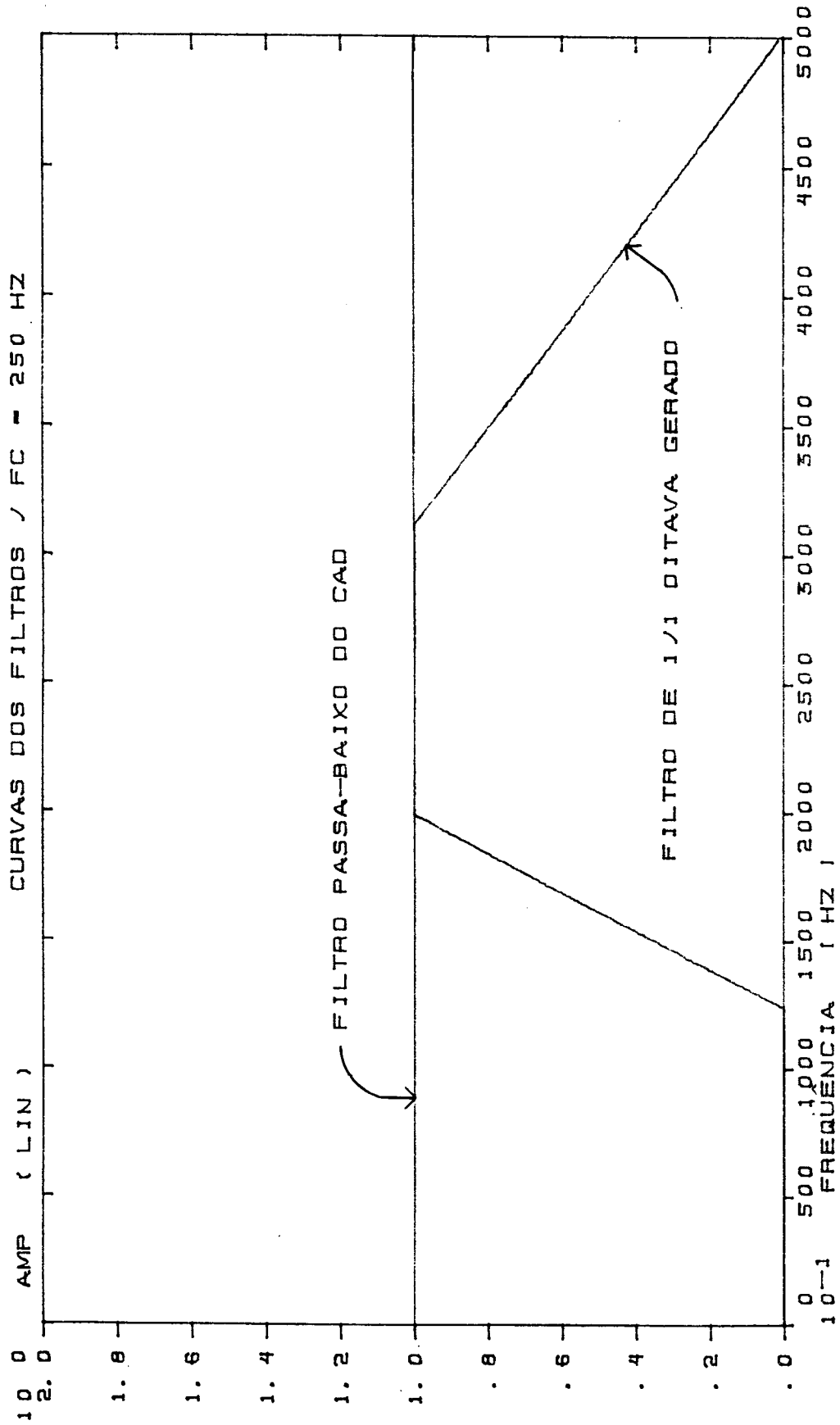


Figura 3.36 - Curvas dos filtros de oitava, analógico e digital, com frequência central de 250 Hz, que superpostas demonstram que todas as componentes de interesse para as bandas em análise não foram eliminadas pelo filtro passa-baixo do CAD.

nenhum componente em frequência de interesse para a banda de oitava em análise. O exemplo apresentado é para a banda com  $F_c = 250$  Hz, pois, juntamente com as de  $F_c = 1k$  e  $2k$ , de acordo com tabela 3.1 já apresentada, possui a frequência máxima adotada igual à frequência de corte do filtro.

As etapas na aquisição dos valores das amplitudes de modulação do sinal de resposta seguem basicamente o processo inverso ao da composição do sinal de teste.

Do sinal de resposta obtido (pressão sonora no tempo), é necessário obter-se seu envelope de intensidade. Quadrando-se o sinal de resposta, ainda no domínio do tempo, o sinal resultante é proporcional à intensidade, conforme demonstrado no capítulo 2, na equação 2.7. Desde que, para verificar-se a função transferência de modulação do ambiente, é necessário somente detectar-se a "envolvente" da função de intensidade, não sendo preciso considerar-se seus valores absolutos, este procedimento é suficiente.

Do sinal quadrado é tirada sua transformada de Fourier, para que, no então espectro envelope, sejam detectadas as amplitudes de modulação. As modulações no sinal de resposta podem não só ser reduzidas em magnitude, mas também sofrer um atraso de tempo (ver capítulo 2, equação 2.8). Porém a função transferência de modulação, como definida aqui, reflete somente as características de "amplitude" da transferência de modulação, sendo a característica em fase relevada.

No tratamento do sinal de resposta, verificou-se a influência da aplicação de janela Hanning nas amostras do sinal.

Elaborou-se um programa em que o analisador executou o processamento de resposta sobre as amostras quando aplicada janela e sobre as mesmas amostras sem seu emprego. Ante os melhores resultados obtidos, apresentados na tabela 3.5, adotou-se a utilização de janela Hanning no processamento digital do sinal de resposta.

Outro teste realizado, ainda processando-se o sinal de teste como resposta, foi verificar-se a influência do número de amostras para aquisição do espectro envelope médio. Com o sinal de teste da banda de 250 Hz, utilizou-se a aquisição de apenas uma amostra e de 5, 10, 20, 50, 100 e 200 amostras. Efetuou-se a comparação através da banda de 250 Hz por ser a única banda de oitava de teste que não apresentou sempre o valor máximo do índice, quando dos testes de qualificação da cadeia de medição (ver tabela 3.3 com os resultados de repetibilidade do sistema com cálculo sobre 20 amostras). Após análise dos resultados adotou-se a média sobre 50 amostras.

**TABELA 3.5 - Comparação dos resultados parciais do IRIS, por banda de frequência, com e sem utilização de janela.**

Nº MED.	SEM JANELA				COM JANELA			
	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz
1	0,9859	1,00	1,00	1,00	0,9949	1,00	1,00	1,00
2	0,9876	1,00	1,00	1,00	0,9976	1,00	1,00	1,00
3	0,9848	1,00	1,00	1,00	0,9902	1,00	1,00	1,00
4	0,9858	1,00	1,00	1,00	0,9935	1,00	1,00	1,00
5	0,9864	1,00	1,00	1,00	0,9928	1,00	1,00	1,00
6	0,9871	1,00	1,00	1,00	0,9985	1,00	1,00	1,00
7	0,9879	1,00	1,00	1,00	0,9983	1,00	1,00	1,00
8	0,9877	1,00	1,00	1,00	0,9940	1,00	1,00	1,00

**TABELA 3.5 / continuação - Comparação dos resultados finais do IRIS, com e sem utilização de janela.**

CONDIÇÃO	NÚMERO DA MEDIÇÃO							
	1	2	3	4	5	6	7	8
SEM JANELA	0,996	0,997	0,996	0,996	0,996	0,997	0,997	0,997
COM JANELA	0,998	0,999	0,997	0,998	0,998	0,999	0,999	0,998

### 3.3.3 Processamento numérico

O resultado do processamento digital é expresso na forma do módulo das amplitudes das frequências de modulação de cada banda de oitava.

Para a obtenção do índice final, qualitativo do ambiente testado, o procedimento de cálculo para cada uma das 4 bandas de oitava é o que se segue:

A) Divide-se a amplitude das frequências de modulação pela amplitude resultante do DC, ficando a forma do sinal de acordo com a equação 2.9. Obtêm-se, então, os índices de modulação final,  $m_f$ , de cada frequência de modulação;

B) Especifica-se o fator redução de modulação,  $m$ , que é a razão entre os índices de modulação final e de modulação inicial,  $m_0$ , de acordo com a equação (2.10);

C) Calcula-se a razão sinal/ruído aparente,  $(S/R)_{ap}$ , que é interpretada como sendo a razão  $(S/R)$  que resultaria neste valor de  $m$  se somente o ruído fosse a causa da deterioração do sinal. Esta conversão é definida matematicamente por:

$$(S/R)_{ap} = 10 \log \frac{m}{1-m} \quad (3.8)$$

Esta expressão é o inverso da 2ª parcela da equação 3.7, que é a componente da deterioração introduzida pelo



ruído.

D) Truncam-se os valores obtidos de  $(S/R)_{ap}$ , quando excederem a faixa de + ou - 15 dB.

E) Com os 15 valores de  $(S/R)_{ap}$ , determina-se a razão sinal/ruído aparente média,  $\overline{(S/R)}_{ap}$ . A seguir normaliza-se este valor, de forma que o índice obtido varie de 0 a 1, de acordo com:

$$IRIS = [ \overline{(S/R)}_{ap} + 15 ] / 30 \quad (3.9)$$

Nos ensaios apresentados a seguir, no capítulo 4, realizou-se o processamento digital dos sinais de resposta, que resulta nas amplitudes de modulação final dos sinais, dados de entrada do procedimento demonstrado acima.

Para este processamento numérico, elaborou-se um programa em linguagem BASIC, apresentado no apêndice B deste estudo, que calcula o valor do IRIS para o ambiente testado.

## CAPÍTULO 4

### RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Neste capítulo são apresentados os resultados das medições feitas em ambientes distintos, em diferentes condições de entorno daqueles espaços, e a análise dos dados obtidos.

Visando a averiguar o desempenho do método, realizaram-se 3 testes: em campo aproximadamente livre; em situação na qual foi simulada a presença somente de ruído de fundo; e, por último, em câmara reverberante sob diversas condições.

Na aplicação do método em caso prático, testou-se uma sala de aula de proporções médias, em diversas condições de ensaio.

#### 4.1 TESTES DE QUALIFICAÇÃO DO MÉTODO

##### 4.1.1 Medição em campo aproximadamente livre

Pela expressão teórica na qual o valor do fator redução de modulação é dado (ver capítulo 3, equação 3.7), vê-se que, quando o tempo de reverberação tende a zero, o valor de  $m$  tende a um.

Nessa situação limite, observa-se que a formulação não abriga aspectos subjetivos da inteligibilidade, quando um mínimo de reverberação é necessário à perfeita compreensão das palavras proferidas no ambiente.

Limitando a conceituação proposta unicamente à situação de um ambiente idealizado, sem reverberação nem ruído de fundo, a resposta ao teste de qualificação de inteligibilidade deve ser igual a um.

A simulação ideal de tal condição é a aplicação do método em câmara anecóica. Porém, ensaiando em campo aproximadamente livre, na presença de algum ruído de fundo e com a resposta captada em ponto próximo à fonte, o resultado do IRIS apresentou-se com a ordem de grandeza esperada, conforme mostrado na tabela 4.1, tanto para os valores parciais por banda de frequência portadora, quanto para o valor final.

TABELA 4.1 - Valor do IRIS para campo aproximadamente livre

VALOR PARCIAL POR FREQUÊNCIA PORTADORA				<u>IRIS</u>
250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	
0,85	1,00	1,00	0,99	0,96

#### 4.1.2 Medição com ruído de fundo simulado

Para a simulação da presença de somente ruído de fundo em um ambiente, efetuou-se a adição de um sinal de ruído branco ao sinal de teste, através de processamento digital no analisador.

A esse sinal foram dadas intensidades médias distintas, para que a deterioração da resposta pudesse ser analisada.

Gerados os sinais, foram calculados os valores do IRIS para o próprio ruído branco, que possui modulação aleatória, e para o sinal resposta resultante da adição do ruído de fundo simulado com o sinal de teste.

A tabela 4.2 explicita os resultados para as 3 condições de teste, denominadas: condição A, para o ruído de fundo com pressão sonora média,  $\bar{P}_r$ ; 10 vezes menor que a do sinal de teste,  $\bar{P}_o$ ; condição B, quando as pressões sonoras médias dos dois sinais são iguais; e condição C, quando a pressão sonora do ruído de fundo é 10 vezes maior que a do sinal de teste.

Visando à comparação ao modelo teórico, foram calculados os valores dos fatores redução de modulação (ver apêndice A, equação A.18) e do IRIS (ver capítulo 3, equações 3.8 e 3.9), demonstrados a seguir:

**TABELA 4.2 - Valores do IRIS para sinal de resposta com ruído de de fundo simulado**

Fc [Hz]	RUÍDO DE FUNDO			+ SINAL = TESTE	SINAL DE RESPOSTA		
	A	B	C		A	B	C
250	0,303	0,150	0,150	1,00	0,972	0,519	0,233
500	0,206	0,168	0,126	1,00	1,00	0,548	0,143
1 K	0,178	0,143	0,161	1,00	1,00	0,495	0,117
2 K	0,326	0,150	0,130	1,00	0,961	0,524	0,142
<u>IRIS</u>	0,25	0,15	0,14	1,00	0,98	0,52	0,16

Sendo o fator redução de modulação dado por:

$$m = \frac{\bar{I}_o}{\bar{I}_o + \bar{I}_r}$$

onde  $\bar{I}_o$  é a intensidade média do sinal de teste e  $\bar{I}_r$  a intensidade média do ruído branco, tem-se:

Condição A

$$\bar{I}_o \propto \bar{P}_o^2$$

$$\bar{P}_r = 0,10 \bar{P}_o$$

$$m = 0,99$$

$$\bar{I}_r = 0,010 \bar{I}_o$$

$$IRIS = 1,00$$

Condição B

$$\bar{I}_o = \bar{I}_r$$

$$m = 0,50$$

$$IRIS = 0,50$$

Condição C

$$\bar{I}_0 \propto \bar{P}_0^2$$

$$\bar{P}_r = 10 \bar{P}_0$$

$$m = 0,0099$$

$$\bar{I}_r = 100 \bar{I}_0$$

$$\text{IRIS} = 0,00$$

Ao serem comparados valores experimentais e teóricos, os resultados encontram-se muito próximos. Observa-se que a obtenção de  $\text{IRIS} = 0$ , na condição de elevado ruído de fundo, é situação teórica ideal, pois mesmo o ruído branco, que possui modulação aleatória, apresenta sempre alguma modulação, da qual resultou um valor do IRIS de 0,16. Excluída tal situação, o afastamento em relação ao modelo teórico foi de 2% e 4%.

4.1.3 Medição em câmara reverberante

A representação do tempo de reverberação tendendo ao infinito, que é uma das formas de conduzir IRIS a zero (ver capítulo 3, equação 3.7), pode ser expressa através de uma série infinita.

Considere-se como primeiro elemento dessa série, uma amostra do sinal de teste que representa a recepção direta do som, como parcela da resposta.

Os demais elementos da série são compostos pelas mesmas amostras do sinal de teste, porém, com tempos de atraso crescentes em relação ao 1º elemento (considerado o tempo de

reverberação infinito não haverá decréscimo nas amplitudes das componentes do sinal de resposta).

Evidencia-se que o sinal resultante deste somatório, representativo de um campo reverberante ideal, corresponderá a uma função constante, de valor igual à média da pressão sonora da excitação.

Com intensidade proporcional ao quadrado da pressão sonora, a função constante obtida para o envelope de intensidade não apresentará modulação alguma, resultando, em consequência, no valor do IRIS = 0.

Para a avaliação, então, de diferentes condições de reverberação como agente de deterioração do sinal de resposta, realizaram-se ensaios na câmara reverberante do Laboratório de Vibrações e Acústica da Universidade Federal de Santa Catarina.

A câmara possui  $401,3 \text{ m}^3$  de volume e a soma das áreas de suas superfícies é de  $328,56 \text{ m}^2$ . Com paredes, teto e piso em concreto pintado, inicialmente formando um volume cúbico, atualmente conta com uma parede, em madeira, inclinada sobre uma das paredes originais. Existe, ainda, uma escada, alguns difusores suspensos e cinco painéis de absorção para baixa frequência, todos os elementos em madeira.

Testou-se o método mediante a realização de seis ensaios: a) quando aumentado o nível de pressão sonora da

excitação, de acordo com a ponderação de cada banda de oitava apresentada no capítulo 3; b) quando alterado o nível do ruído de fundo existente na câmara, utilizando-se um gerador de ruído branco B&K filtrado na mesma banda e com mesmo nível de pressão sonora do sinal de teste, e c) quando modificado o tempo de reverberação médio,  $\bar{T}_r$ , com a retirada dos painéis de absorção da câmara.

As condições de teste encontram-se apresentadas, de forma esquemática, na tabela 4.3.

Os resultados das medições, apresentados na tabela 4.4, foram obtidos em um só ponto do ambiente, porque, no campo quase totalmente difuso, a energia sonora está homogeneamente distribuída no espaço e, também, porque a aplicação em câmara reverberante visa somente a observar o comportamento da técnica e não a qualificar o ambiente.

#### Análise dos resultados

1) Alteração do nível da excitação - considerando que, em campo idealmente difuso, não existe caimento do nível de pressão sonora com a distância, originando a mesma razão sinal/ruído em qualquer ponto de espaço; considerando, ainda, que o crescimento do nível de intensidade sonora não altera o grau de modulação do sinal, mas aumenta a modulação relativa à I, é esperado que o valor do IRIS cresça para as condições A, B



**TABELA 4.3 - Condições de teste na câmara reverberante**

CONDIÇÃO	PAINEL ABS	RUÍDO DE FUNDO	NÍVEL EXCIT. [dB]	Tr MÉDIO [s]
A	x		60,5 → 50	4,30
B	x		80,5 → 70	
C	x		85,5 → 75	
D	x	x	60,5 → 50	
E			60,5 → 50	5,57
F		x	60,5 → 50	

**TABELA 4.4 - Valor do IRIS para câmara reverberante**

CONDIÇÃO	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	<u>IRIS</u>
A	0,38	0,40	0,36	0,36	0,38
B	0,46	0,37	0,32	0,32	0,37
C	0,45	0,36	0,35	0,33	0,37
D	0,34	0,32	0,33	0,31	0,33
E	0,35	0,40	0,38	0,32	0,37
F	0,34	0,31	0,34	0,30	0,32

e C. Observados os resultados, a diferença verificada é desprezível, apresentando-se os valores com apenas ligeira flutuação.

2) Alteração do nível do ruído de fundo - as condições ditas sem

ruído de fundo referem-se a ensaios realizados com a razão sinal/ruído de, pelo menos, 30 dB. Posta a razão igual a zero dB, nas condições D e F, foi confirmado que a existência de ruído de fundo se reflete diretamente nos resultados. Comparando-se, ainda, as condições A e D e E e F, observa-se que o grau de deterioração foi indiferente ao tempo de reverberação da sala, pois, em ambos os casos, o índice decresceu 0,05 pontos.

3) Alteração do tempo de reverberação - para verificar tal situação, confrontaram-se os valores das condições A e E e D e F de ensaio. Apesar de apresentarem uma tendência correta, com o valor do IRIS inversamente proporcional ao tempo de reverberação, a diferença de valores absolutos foi muito pequena.

Apesar do comportamento correto nas diversas condições de teste, verifica-se que, conforme observado no ensaio com ruído de fundo simulado (item 4.1.2), o limite inferior real da escala de valores do IRIS é diferente de zero. Na condição experimental menos favorável a uma boa inteligibilidade, com reverberação excessiva e razão sinal/ruído igual a zero, obteve-se o índice de 0,32.

A figura 4.1 apresenta o índice de Transmissão de Fala relacionado a uma escala subjetiva de inteligibilidade.

Na associação de resultados do ITF, no qual o método estudado é baseado, com qualificações subjetivas de

---

RUIM				POBRE		REGULAR		BOM	EXCELENTE			
	+	+	+	+	+	+	+		+	+	+	+
0	0,10	0,20	0,30	0,40	0,50	0,60	0,70	0,80	0,90	1,00		

---

Figura 4.1 - Interpretação qualitativa do índice [4].

inteligibilidade, vê-se que, erroneamente, a situação mais desfavorável seria compreendida como uma condição "pobre" de qualidade acústica, e não "ruim", como esperado.

Calculando-se o valor do IRIS teoricamente, conforme equações 3.7, 3.8 e 3.9 apresentadas no capítulo 3, obtém-se zero para todas as situações testadas na câmara reverberante, demonstrando que a teoria caracteriza a condição como "ruim", o que reforça a expectativa de valores menores que os encontrados.

## 4.2 TESTES EM SALA DE AULA

Qualificado o método, sua utilização em caso prático foi avaliada em uma sala de aula do Centro Tecnológico da Universidade Federal de Santa Catarina, com capacidade para 50 alunos.

A sala, apresentada na figura 4.2, está posicionada em uma das extremidades do bloco de salas de aula, comunicando-se com outra sala adjacente e com a circulação interna da edificação. Com dimensões de 7,10 m x 10,60 m x 3,30 m, possui paredes revestidas de tijolo aparente, piso rígido de alta resistência, teto e vigas em concreto aparente, portas em madeira pintada e esquadrias, voltadas para um pequeno pátio externo, em alumínio e vidro. A fonte sonora, geradora do sinal de teste, foi colocada sobre o tablado de madeira existente para o professor, no local a ser ocupado por este.

Foram realizadas seis condições de teste, apresentadas esquematicamente na tabela 4.5, junto com o tempo de reverberação médio de cada ensaio,  $\bar{T}_r$ , nas quais variaram-se a absorção sonora média e o nível de ruído de fundo. Mediram-se 10 pontos da sala, os de números 1 a 10 assinalados na figura 4.2. Somente para uma das condições de teste foram medidos todos os 20 pontos apresentados.

O tempo de reverberação relativo a cada uma das condições de ensaio encontra-se na tabela 4.6.

Na condição A, as portas foram mantidas fechadas, como em todas as outras condições, porém as janelas permaneceram abertas. Com a movimentação comum ao funcionamento do prédio, inclusive alunos conversando nas circulações, este é o ensaio da sala em sua condição normal de uso, apesar de o ruído de fundo não poder ser monitorado.

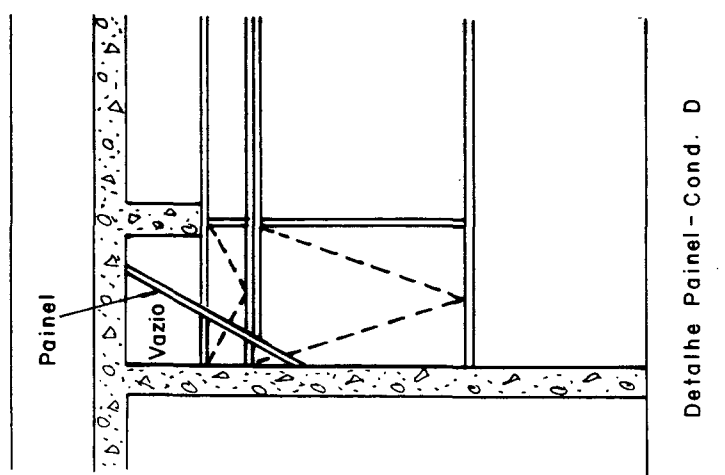
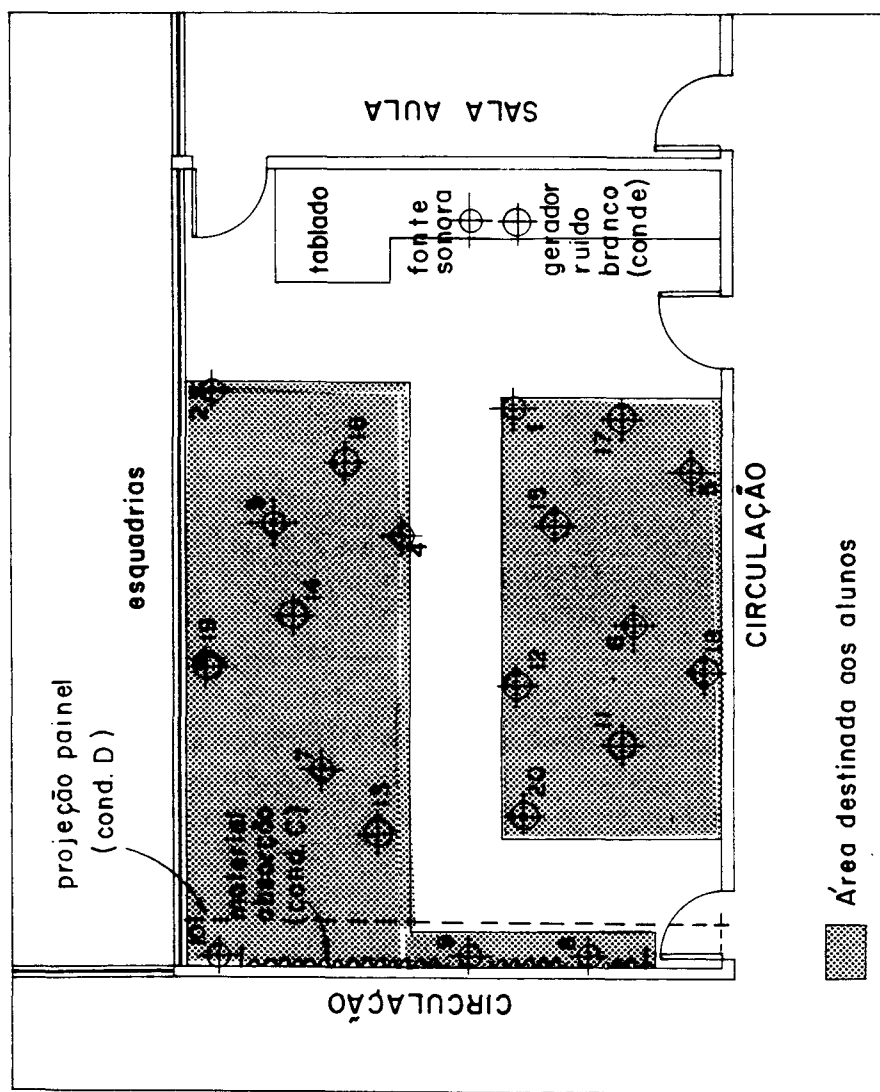


Figura 4.2 - Planta baixa da sala de aula utilizada nos ensaios, assinalados os locais dos pontos de medição; da colocação da fonte sonora da excitação de teste e da fonte geradora do ruído branco da condição E; do posicionamento do material de absorção da condição C; e do painel de absorção da condição D de ensaio. No detalhe pode ser visto a forma de colocação do painel.

TABELA 4.5 - Condições de teste em sala de aula

COND	JANELA	PAINEL	MAT ABS	RUÍDO DE FUNDO	$\bar{T}_r[s]$
A	aberta			fala	1,44
B	fechada				1,64
C	fechada		x		1,29
D	fechada	x			1,27
E	fechada			ruído branco	1,64
F	fechada		x		0,82

TABELA 4.6 - Tempo de reverberação das diversas condições de de ensaio [s]

COND	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz
A	1,42	1,56	1,42	1,34
B,E	1,60	1,78	1,60	1,59
C	1,32	1,32	1,25	1,25
D	1,16	1,36	1,30	1,27
F	0,77	0,80	0,84	0,87

Na condição B o teste foi realizado durante a noite, quando cessa a ministração de aulas e o ruído do tráfego urbano diminui sensivelmente.

Para a condição C, foram introduzidos 6,88 m<sup>2</sup> de material de absorção na sala. O material, constituído de manta

de fibra de vidro, que foi colocada junto à parede de fundo da sala, possui um coeficiente de absorção que varia de 0,85 a 1,00 nas bandas de 1/1 oitava de 250 Hz a 2 kHz.

Para a condição D, retirado o material de absorção, foram colocados painéis de madeira na aresta formada pela parede de fundo e o teto, conforme mostrado em detalhe na figura 4.2, para que atuassem como absorvedores de baixa frequência. Nesta situação foram obtidas as respostas nos 20 pontos assinalados.

Na condição E, a sala voltou à sua situação original de absorção e o teste foi realizado na presença de ruído branco, filtrado na mesma banda de oitava do sinal de teste, como ruído de fundo. A fonte geradora do ruído e a fonte do sinal de teste foram colocadas lado a lado e com o mesmo nível de pressão sonora (calibrado a um metro das fontes).

No último teste, chamado de condição F, reduziu-se o tempo de reverberação da sala ao valor considerado ideal para atividade a que se destina [18]. Foram distribuídos, por toda a sala, 10,80 m<sup>2</sup> de placas de fibra de vidro, a qual possui coeficiente de absorção igual a um para as quatro bandas de frequência do sinal de teste.

O nível de pressão sonora do sinal de excitação em todas as condições de ensaio foi o mesmo. Mantida a ponderação entre as bandas de frequência portadoras, o nível variou de 80,5 dB em 250 Hz a 70 dB em 2 kHz.

### Análise dos resultados

A tabela 4.7 apresenta os valores médios nos pontos medidos, por banda de frequência, e o valor final do IRIS para as seis condições ensaiadas.

Em uma interpretação qualitativa, conforme ilustra a figura 4.1 já apresentada, os resultados encontrados classificariam o ambiente entre pobre e regular, o que parece de acordo com as características acústicas da sala.

**TABELA 4.7 - Resultado do IRIS para a sala de aula**

COND	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	<u>IRIS</u>
A	0,55	0,60	0,53	0,41	0,53
B	0,52	0,57	0,48	0,37	0,49
C	0,55	0,64	0,55	0,44	0,55
D	0,54	0,53	0,50	0,40	0,50
E	0,41	0,40	0,37	0,36	0,39
F	0,55	0,56	0,58	0,47	0,55

#### 4.2.1 Sala de aula sem alterações

A tabela 4.8 apresenta os resultados da condição A de teste em cada um dos pontos de medição.



TABELA 4.8 - Resultado do IRIS para sala de aula - condição A

Fc [Hz]	PONTO DE MEDIÇÃO									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
250	0,34	0,48	0,66	0,74	0,43	0,61	0,64	0,54	0,55	0,49
500	0,68	0,62	0,64	0,39	0,60	0,62	0,62	0,62	0,59	0,61
1 k	0,53	0,64	0,44	0,63	0,54	0,54	0,55	0,38	0,54	0,48
2 k	0,47	0,44	0,44	0,44	0,45	0,41	0,35	0,31	0,43	0,40
<u>IRIS</u>	0,51	0,55	0,55	0,55	0,51	0,55	0,55	0,47	0,53	0,50

Na análise das condições normais de uso da sala, observa-se que, ao serem mantidas as janelas abertas, permitindo que o ruído externo atinja mais facilmente o interior, obtém-se simultaneamente um aumento nas características de absorção do ambiente. As condições de ensaio da sala somaram-se, então, fatores positivos e negativos que, quando combinados, trouxeram, como resultado, um desempenho razoável em comparação às outras situações testadas.

Porém, não se pode creditar somente a tais fatores o melhor desempenho da condição A em relação à condição D, já que esta última apresenta maior coeficiente de absorção sonora médio espacial, sendo, portanto, mais favorável a um melhor resultado.

A justificativa para este comportamento talvez encontre-se na natureza do ruído de fundo utilizado no ensaio. Em todas as demais situações testadas, seja em câmara

reverberante, seja em sala de aula, sempre que existiu a presença de ruído branco como ruído de fundo, obteve-se diminuição dos valores do índice, conforme esperado. Pode-se inferir, portanto, que tal como na condição A, a realização do teste tendo a fala como ruído de fundo parece mascarar os resultados finais, através de um enriquecimento dos valores.

#### 4.2.2 Sala com alteração das características de absorção sonora

Para análise da influência da absorção sonora média da sala na inteligibilidade, foram comparados os resultados dos ensaios nas condições B, C, D e F. A tabela 4.9 resume, apresentando somente o valor final do IRIS para cada ponto de medição, os resultados das condições B, C, D e F mostrados a seguir nas tabelas 4.10, 4.11, 4.12 e 4.13, respectivamente.

Pelos resultados, verifica-se que as condições de melhor desempenho para a inteligibilidade foram obtidos nos ensaios em que se utilizou material de absorção.

Observa-se, no entanto, que mesmo a relação sinal/ruído estando satisfatória e o tempo de reverberação muito próximo do ideal, não está assegurado um acréscimo significativo ao índice final.

Credita-se à geometria da sala, parâmetro relevante na

TABELA 4.9 - Resultado do IRIS para sala de aula/conds.B,C,D e F

PONTO	CONDIÇÃO			
MEDIÇÃO	B	C	D	F
1	0,43	0,47	0,51	0,64
2	0,43	0,56	0,57	0,56
3	0,53	0,55	0,50	0,59
4	0,54	0,64	0,51	0,61
5	0,54	0,59	0,49	0,53
6	0,51	0,57	0,47	0,51
7	0,49	0,55	0,51	0,51
8	0,43	0,50	0,43	0,49
9	0,49	0,60	0,46	0,52
10	0,45	0,49	0,53	0,50

inteligibilidade, conforme mencionado no capítulo 1, a responsabilidade sobre esse resultado. Em estudo realizado por REYNA [19], com salas que possuíam paredes paralelas, como no caso ora estudado, não foram obtidos valores superiores a 0,6, situação coerente, portanto, com os resultados aqui obtidos.

**TABELA 4.10 - Resultado do IRIS para sala de aula - condição B**

Fc [Hz]	PONTO DE MEDIÇÃO									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
250	0,34	0,51	0,57	0,81	0,52	0,58	0,58	0,42	0,49	0,41
500	0,44	0,58	0,62	0,49	0,59	0,63	0,62	0,54	0,67	0,53
1 k	0,53	0,53	0,50	0,53	0,58	0,48	0,39	0,34	0,40	0,44
2 k	0,39	0,39	0,41	0,29	0,43	0,29	0,33	0,42	0,38	0,43
<u>IRIS</u>	0,43	0,43	0,53	0,54	0,54	0,51	0,49	0,43	0,49	0,45

**TABELA 4.11 - Resultado do IRIS para sala de aula - condição C**

Fc [Hz]	PONTO DE MEDIÇÃO									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
250	0,40	0,40	0,53	0,84	0,53	0,66	0,55	0,42	0,55	0,54
500	0,50	0,57	0,72	0,64	0,67	0,59	0,67	0,65	0,81	0,55
1 k	0,55	0,63	0,51	0,60	0,60	0,56	0,51	0,52	0,52	0,45
2 k	0,39	0,53	0,40	0,44	0,56	0,44	0,42	0,36	0,48	0,42
<u>IRIS</u>	0,47	0,56	0,55	0,64	0,59	0,57	0,55	0,50	0,60	0,49

**TABELA 4.12 - Resultado do IRIS para sala de aula - condição D**

Fc [Hz]	PONTO DE MEDIÇÃO									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
250	0,49	0,78	0,49	0,63	0,49	0,56	0,55	0,38	0,51	0,51
500	0,57	0,48	0,56	0,56	0,54	0,52	0,56	0,53	0,49	0,53
1 k	0,56	0,59	0,47	0,47	0,50	0,39	0,54	0,38	0,41	0,66
2 k	0,39	0,40	0,49	0,35	0,41	0,39	0,37	0,42	0,40	0,41
<u>IRIS</u>	0,51	0,57	0,50	0,51	0,49	0,47	0,51	0,43	0,46	0,53

TABELA 4.13 - Resultado do IRIS para sala de aula - condição F

Fc [Hz]	PONTO DE MEDIÇÃO									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
250	0,60	0,46	0,54	0,56	0,51	0,62	0,52	0,50	0,60	0,54
500	0,75	0,68	0,61	0,63	0,58	0,46	0,52	0,44	0,51	0,46
1 k	0,65	0,59	0,64	0,71	0,56	0,56	0,50	0,53	0,48	0,56
2 k	0,52	0,47	0,56	0,49	0,46	0,39	0,48	0,45	0,45	0,42
<u>IRIS</u>	0,64	0,56	0,59	0,61	0,53	0,51	0,51	0,49	0,52	0,50

	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
250	0,44	0,47	0,49	0,58	0,51	0,56	0,48	0,62	0,49	0,54
500	0,57	0,56	0,54	0,65	0,53	0,53	0,59	0,62	0,58	0,64
1 k	0,43	0,52	0,48	0,49	0,47	0,43	0,47	0,48	0,41	0,42
2 k	0,36	0,34	0,38	0,32	0,42	0,40	0,38	0,37	0,35	0,37
<u>IRIS</u>	0,46	0,48	0,48	0,52	0,49	0,48	0,49	0,53	0,46	0,50

#### 4.2.3 Sala com alteração das condições de ruído de fundo

Para análise da influência da razão sinal/ruído no ambiente ensaiado, compararam-se as condições B e E de teste, onde foram mantidas constantes as características de absorção da sala.

Os valores parciais, por ponto de medição, da condição

E são apresentados na tabela 4.14. Observa-se que foi o ensaio que apresentou distribuição qualitativa mais homogênea, com diferença máxima de 0,09 entre as posições de melhor e pior qualidade acústica.

O comportamento obtido com a introdução de ruído de fundo, quando o índice apresentou um caimento de 0,10, satisfaz a relação esperada entre os dois ensaios.

**TABELA 4.14 - Resultado do IRIS para sala de aula - condição E**

PONTO MEDIÇÃO	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	<u>IRIS</u>
1	0,38	0,38	0,36	0,37	0,37
2	0,39	0,40	0,36	0,38	0,38
3	0,39	0,37	0,37	0,38	0,38
4	0,44	0,37	0,40	0,36	0,39
5	0,39	0,42	0,41	0,34	0,39
6	0,41	0,37	0,35	0,33	0,37
7	0,42	0,34	0,36	0,38	0,38
8	0,39	0,48	0,37	0,38	0,41
9	0,40	0,39	0,37	0,34	0,38
10	0,44	0,44	0,39	0,36	0,41

Em termos absolutos, o resultado final da condição E é reconhecido como satisfatório. Considerando que a razão sinal/ruído igual a zero, isoladamente, conduziria o valor final a 0,5, conforme apresentado neste capítulo, item 4.1.2, parece coerente a obtenção do  $IRIS = 0,39$  quando outros fatores de deterioração estão presentes.

#### 4.2.4 Análise dos fatores redução de modulação

Para as condições em que se alteraram apenas os tempos de reverberação, nas quais as razões sinal/ruído foram mantidas constantes, calcularam-se os valores dos fatores redução de modulação a partir das amplitudes de modulação obtidas nos ensaios. Seus valores encontram-se na tabela 4.15.

Cada um dos valores apresentados foi calculado sobre a média espacial dos 10 pontos de medição.

Excetuando-se uma inversão ocorrida na banda de 250 Hz, condição C, o resultado reforça o modelo teórico apresentado nos capítulos anteriores, no qual os fatores redução de modulação comportam-se como filtros passa-baixo em cada uma das bandas de frequência portadoras.

Outra observação pode ser tirada dos valores apresentados na tabela 4.15. As frequências de modulação que se repetem, nas bandas de oitava com frequência central de 1 kHz e

TABELA 4.15 - Fator redução de modulação para sala de aula

Fc [Hz]	FREQ. MODUL [Hz]	CONDIÇÃO				
		A	B	C	D	F
250	1,709	0,39	0,39	0,39	0,35	0,42
	3,174	0,26	0,23	0,26	0,32	0,35
	6,348	0,23	0,23	0,23	0,26	0,26
	12,70	0,23	0,23	0,26	0,19	0,13
500	0,976	0,45	0,43	0,45	0,40	0,40
	1,954	0,33	0,33	0,43	0,30	0,30
	3,907	0,30	0,28	0,28	0,23	0,30
	7,813	0,13	0,15	0,18	0,15	0,18
1 k	1,221	0,43	0,30	0,43	0,40	0,45
	2,442	0,28	0,25	0,33	0,25	0,38
	4,883	0,23	0,18	0,18	0,15	0,20
	9,766	0,15	0,15	0,18	0,15	0,15
2 k	2,442	0,27	0,22	0,33	0,27	0,33
	4,883	0,16	0,16	0,18	0,16	0,20
	9,766	0,11	0,09	0,11	0,13	0,13

2 kHz, demonstraram deterioração em uma mesma ordem de grandeza, independentemente da banda de frequência portadora. O maior valor de afastamento entre dois fatores redução de modulação, de mesma frequência de modulação, foi de 0,07, sendo o afastamento médio da ordem de 0,028.



## CAPÍTULO 5

### SUMÁRIO, CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

#### 5.1 SUMÁRIO

O principal objetivo deste estudo foi a implantação, em sistema digital, de um método direto de obtenção da qualidade acústica de ambientes, avaliada sob o prisma da inteligibilidade.

Partindo-se de considerações atuais, que agilizam o estudo de salas através do conceito função transferência de modulação, criou-se o sinal de teste a ser empregado na excitação acústica dos ambientes, e programou-se o analisador digital para captar e processar os sinais de resposta.

Após a devida verificação e qualificação do sistema de geração e captação dos sinais, como também a qualificação do próprio sinal em si, analisaram-se as respostas obtidas quando os parâmetros de influência considerados encontravam-se em situações extremas.

Avaliado o comportamento do índice nos casos limites, a aplicação prática do método realizou-se em uma sala de aula, ambiente cujo parâmetro inteligibilidade é de fundamental

relevância. Efetuaram-se medições em diversas condições de absorção sonora e de níveis de ruído de fundo, investigando-se a influência direta desses parâmetros no resultado final.

## 5.2 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O estudo desenvolvido para a implantação da metodologia digital de avaliação de inteligibilidade, e os dados colhidos nos diversos ensaios, permitem tecer algumas considerações finais.

- Na formulação teórica da composição do sinal de teste, foram apresentadas as frequências de modulação que compõem a fala humana. A escolha de 15 delas para comporem o sinal de excitação, consideradas as características do próprio equipamento utilizado, teve como critério descrever a curva da modulação presente na fala com razoável resolução.

Calculados os fatores redução de modulação, a partir dos dados obtidos nos diversos ensaios da sala de aula, observa-se que mesmas frequências de modulação apresentaram-se com valores de mesma ordem de grandeza, embora estando em bandas de frequência portadoras distintas. Fica demonstrada assim a não existência de qualquer tendência nos resultados, fruto da composição adotada para o sinal de excitação.

- Outro aspecto relevante diz respeito ao nível da

pressão sonora de teste a ser adotado nos ensaios dos ambientes, que deve estar condicionado somente a representar a utilização real das salas, já que a intensidade média da excitação reflete-se diretamente no índice de modulação final.

Os ensaios em câmara reverberante, sem ruído de fundo, demonstraram que diferentes níveis de excitação resultaram em mesmos valores finais do índice, já que as alterações não são suficientes, perante a degeneração ocasionada pela reverberação, para a melhora do resultado final. Conclui-se, portanto, que assegurada a representação da situação real, o nível de pressão adotado não influencia o resultado final.

- O ensaio em campo aproximadamente livre com alta razão sinal/ruído, simulação muito perto da condição ideal ótima de teste, indicou, pelos dados colhidos, o correto comportamento do índice na situação máxima favorável de teste.

Os mesmos resultados, contudo, não foram obtidos quando ensaiadas condições que simulavam situações extremamente desfavoráveis de teste.

A obtenção de  $IRIS = 0$ , pela formulação teórica, pode ser conseguida através de:

- razão sinal/ruído tendendo a menos infinito;
- tempo de reverberação com valor infinito;

ou, ainda, a soma destes dois fatores.

Para análise do comportamento do índice sob diversas proporções de sinal/ruído, um dos ensaios realizados foi a simulação matemática do ruído de fundo com intensidade 100 vezes superior à intensidade do sinal de excitação.

Apesar de o valor obtido para IRIS ser muito próximo de zero, 0,16, observa-se, no cálculo do fator redução de modulação, que o próprio ruído de fundo, isoladamente, chegou a apresentar o valor de 0,25, que conduziria a  $IRIS = 0,34$ .

Fica patente, portanto, a existência de uma faixa de valores, partindo de zero e podendo chegar talvez até a 0,35, que, quando o ambiente está sob efeito de somente ruído de fundo, deve ser considerada como a obtenção do índice nulo, já que qualquer valor nesta faixa não representa preservação da modulação.

No estudo da influência do outro parâmetro de ensaio, demonstrou-se que o valor de IRIS tende a zero quando o tempo de reverberação tende ao infinito.

Nos ensaios realizados em câmara reverberante com razão sinal/ruído maior que 30 dB, os valores de IRIS foram de 0,38 e 0,37. Para situações práticas, então, é possível afirmar que quando a causa de deterioração da inteligibilidade for somente reverberação, o índice dificilmente acusará uma classificação subjetiva "ruim" (valores menores que 0,30, conforme apresentado no capítulo 4, figura 4.1).

- Mais um aspecto positivo derivado deste estudo é a evidência de que outros parâmetros além do tempo de reverberação e da razão sinal/ruído, únicos elementos presentes na formulação matemática, contribuem para o resultado final do índice.

No teste em que a sala de aula apresentava absorção média e nível do ruído de fundo em condições altamente favoráveis quando comparados aos outros ensaios, mesmo assim, o valor de IRIS pouco cresceu. Fica nítido, então, que outras circunstâncias ainda prejudicavam o bom desempenho da sala, como por exemplo, sua geometria espacial, que classicamente é pouco recomendada para sua atividade-fim.

O estudo apresentado ao longo deste trabalho abordou os seguintes aspectos:

- composição e qualificação do sinal de teste;
- montagem e verificação do sistema de medição;
- implantação do processamento digital e computacional para análise do sinal de resposta;
- avaliação dos parâmetros de influência em situações extremas, quando IRIS tende a seu valor mínimo;
- emprego do método, sob diversas condições, no ambiente onde inteligibilidade é fator crucial: a sala de aula.

Sugere-se como prosseguimento para novos trabalhos a inclusão do estudo da direcionalidade da fonte de excitação

sonora, que já simula o orador em aspectos tais como: posição ocupada na sala, características da fala e nível de pressão sonora.

Com vistas ao enriquecimento do estudo da inteligibilidade, outra linha de pesquisa seria necessária: a realização de amplo levantamento da fala nacional, a fim de serem detectados possíveis ritmos e composições próprias que divirjam de outras línguas latinas. Dessa análise pode derivar a criação de testes subjetivos específicos à língua portuguesa, que viriam contribuir para a avaliação de metodologias objetivas de qualificação de salas.

## APÊNDICE A

### FATOR REDUÇÃO DE MODULAÇÃO

---

#### Constante de Tempo Exponencial em Salas

A equação diferencial que rege o crescimento ou o caimento sonoro em um ambiente pode ser derivada fazendo-se o balanço de energias: a potência gerada por uma fonte sonora,  $W$ , é igual à energia absorvida pelas superfícies do ambiente mais o crescimento da energia na sala. Então:

$$W = V \frac{d\epsilon}{dt} + \frac{A c}{4} \epsilon \quad (\text{A.1})$$

onde,

$V$  = volume da sala

$d/dt$  = derivada em relação ao tempo

$\epsilon$  = densidade de energia sonora

$A$  = absorção total no ambiente

$c$  = velocidade do som no meio

A equação que determina o caimento da energia é obtida igualando-se a potência sonora a zero em (A.1),

$$V \frac{d\epsilon}{dt} + \frac{A c}{4} \epsilon = 0 \quad (\text{A.2})$$

Em que a solução da equação diferencial linear de 1ª ordem é:

$$\epsilon(t) = \epsilon(0) e^{-\frac{Ac}{4V} t}$$

ou

(A.3)

$$P^2(t) = P^2(0) e^{-\frac{Ac}{4V} t}$$

onde,

t = tempo

P = pressão sonora instantânea

Portanto, a variação do nível de pressão sonora durante um intervalo de tempo t é dada por:

$$10 \log P^2(t) - 10 \log P^2(0) = 10 \log e^{-\frac{Ac}{4V} t}$$

$$\Delta NPS = -\frac{Ac}{4V} t \cdot 10 \log e \quad (A.4)$$

$$\Delta NPS = -4,34294 \frac{Ac}{4V} t$$

onde  $\Delta NPS$  é a diferença de nível de pressão sonora.

Então para que o nível decresça em 60 dB, de acordo com definição de tempo de reverberação, e fazendo-se  $t = Tr$ , tem-se:



$$60 = 4.34294 \frac{Ac}{4V} Tr \quad (A.5)$$

$$Tr = 13,8 \frac{4V}{Ac}$$

A constante de tempo exponencial,  $\tau$ , é então dada por:

$$\tau = \frac{4V}{Ac} \quad (A.6)$$

### Fator Redução de Modulação

Considere-se a intensidade instantânea de excitação,  $I_0(t)$ , onde se adotou somente uma função harmônica para modulação e o índice de modulação inicial igual a um dada pela expressão (ver capítulo 2, expressão 2.7):

$$I_0(t) = I_b(t) (1 + \cos 2\pi f_m t) \quad (A.7)$$

onde,

$I_b(t)$  = amplitude da intensidade acústica do ruído  
branco na excitação

$f_m$  = frequência de modulação

$t$  = tempo

E o sinal de resposta,  $I_f(t)$ , dado pela expressão (ver capítulo 2, equação 2.9):

$$I_f(t) = I_p(t) [1 + m_f \cos 2\pi f m(t - t')] \quad (\text{A.8})$$

onde,

$I_p(t)$  = intensidade acústica do ruído branco na  
resposta

$m_f$  = índice de modulação final

$t'$  = tempo de atraso

A resposta do sistema pode ser também descrita em termos de convolução da excitação com a resposta impulsiva quadrática,  $r(t)$ , pela equação:

$$I_f(t) = \int_0^\infty I_0(t - t') \cdot r(t') dt' \quad (\text{A.9})$$

Utilizando-se a notação complexa de  $I_0(t)$ ,

$$I_0(t) = I_b(t) [1 + \text{Re}(e^{i2\pi f t})] \quad (\text{A.10})$$

onde  $\text{Re}$  é a parte real da função, na equação (A.9), tem-se

$$I_f(t) = \int_0^\infty I_b(t) [1 + \text{Re}(e^{i2\pi f(t-t')})] r(t') dt'$$

$$I_f(t) = I_b(t) \left[ \int_0^\infty r(t') dt' + \int_0^\infty \text{Re}(e^{i2\pi f(t-t')}) r(t') dt' \right] \quad (\text{A.11})$$

$$I_f(t) = I_b(t) \left[ \int_0^\infty r(t') dt' + \int_0^\infty \text{Re}(e^{i2\pi f t} e^{-i2\pi f t'}) r(t') dt' \right]$$

$$I_f(t) = I_b(t) \left\{ \int_0^\infty r(t') dt' + \operatorname{Re} \left[ e^{i2\pi ft} \int_0^\infty e^{-i2\pi ft'} r(t') dt' \right] \right\}$$

Fazendo,

$$a = \int_0^\infty r(t') dt'$$

(A.12)

$$\underline{b} = \int_0^\infty e^{-i2\pi ft'} \cdot r(t') dt'$$

E escrevendo-se a equação (A.11) em forma similar a (A.8) utilizando-se as novas variáveis descritas em (A.12) tem-se:

$$I_f(t) = a I_b(t) \left[ 1 + \frac{1}{a} \operatorname{Re} (\underline{b} e^{i2\pi ft}) \right] \quad (\text{A.13})$$

Portanto,

$$m = \frac{\text{módulo } \underline{b}}{a}$$

ou,

$$m = \frac{\left| \int_0^\infty e^{-i2\pi ft} \cdot r(t) dt \right|}{\int_0^\infty r(t) dt} \quad (\text{A.14})$$

Considerando-se a reverberação como puramente exponencial (ver neste apêndice a parte referente à constante de tempo exponencial em salas), tem-se

$$r(t) = B \cdot e^{-\frac{t}{T_r}}$$

$$r(t) = B \cdot e^{-\frac{A_r}{4V} t} \quad (\text{A.15})$$

$$r(t) = B \cdot e^{-\left(\frac{13,8}{T_r}\right) t}$$

onde B é constante.

Substituindo-se (A.15) em (A.14), tem-se:

$$m = \frac{\left| \int_0^\infty e^{-i2\pi f t} \cdot B \cdot e^{-\left(\frac{13,8}{T_r}\right) t} dt \right|}{\int_0^\infty B \cdot e^{-\left(\frac{13,8}{T_r}\right) t} dt}$$

$$m = \left| \frac{-B e^{-\left(\frac{13,8}{T_r} + i2\pi f\right) t}}{\left(\frac{13,8}{T_r} + i2\pi f\right)} \right|_0^\infty$$

$$m = \left| \frac{-\frac{B T_r}{13,8} e^{-\left(\frac{13,8}{T_r}\right) t}}{0} \right|_0^\infty$$

$$m = \left| \frac{13,8}{(13,8 + i2\pi f T_r)} \right|$$
(A.16)

logo,

$$m = \frac{1}{\sqrt{1 + (2\pi f T_r / 13,8)^2}} \quad (\text{A.17})$$

que é o fator de redução de modulação quando considerada apenas a reverberação na deterioração do sinal.

Quando o sinal da excitação sofre apenas ruído de fundo, tem-se:

$$m = \frac{\bar{I}_o}{\bar{I}_o + \bar{I}_r} \quad (\text{A.18})$$

onde  $\bar{I}_r$  é a intensidade média do ruído de fundo.

Considerando-se a razão sinal/ruído,  $(S/R)$ , como,

$$(S/R) = 10 \log \left( \frac{\bar{I}_o}{\bar{I}_r} \right) \quad (\text{A.19})$$

tem-se que,

$$\frac{(S/R)}{10} = \log \left( \frac{\bar{I}_o}{\bar{I}_r} \right)$$

$$10^{(S/R)/10} = \frac{\bar{I}_o}{\bar{I}_r}$$

$$10^{-(S/R)/10} = \frac{\bar{I}_r}{\bar{I}_o}$$

(A.20)

Desenvolvendo-se (A.18) e aplicando-se (A.20) chega-se:

$$\frac{1}{m} = \frac{\bar{I}_0 + \bar{I}_r}{\bar{I}_0} = 1 + \frac{\bar{I}_r}{\bar{I}_0}$$

(A.21)

$$\frac{1}{m} = 1 + 10^{-(S/R)/10}$$

$$m = \left(1 + 10^{-(S/R)/10}\right)^{-1}$$

Então, o valor do fator de redução de modulação será o produto das componentes relativas a cada um dos tipos de deterioração:

$$m = \frac{1}{\sqrt{1 + (2\pi f Tr/13,8)^2}} \cdot \frac{1}{(1 + 10^{-(S/R)/10})} \quad (A.22)$$

## APENDICE B

### PROGRAMAS PARA PROCESSAMENTO DE SINAIS NO ANALISADOR DIGITAL

#### CALCULO DE RAIZ QUADRADA DE SINAL NO TEMPO

1 L	1				
5 Y	1804	2000	1	2	
12 Y	1800	1	0		
18 Y	1800	2	1		
24 L	2				
28 Y	1821	2001	2	1D	
35 Y	1827	2002	2001D	2000D	
42 Y	1822	2002	1	1D	
49 Y	1801	1	1D	2D	
56 #	2	4096	0		
62 .					

## COMPARAÇÃO ENTRE RESPOSTAS COM E SEM JANELA

1	L	1			
5	CL	1			
9	CL	5			
13	L	2			
17	CL	0			
21	RA				
24	*	0			
28	X>	6			
32	H1	0			
36	F	0			
40	F	6			
44	*-				
47	*-	6			
51	A+	1			
55	X>	1			
59	CL	0			
63	X<	6			
67	A+	5			
71	X>	5			
75	#	2	20	0	
81	:	1	20		
86	:	5	20		
91	L	3			
95	CL	0			
99	F	0			
103	Y	1804	3000	1	2
110	Y	1800	1	0	0
117	Y	1800	2	1	0
124	L	4			
128	Y	1821	3001	1	1D
135	Y	1827	3002	3001D	3000D
142	Y	1822	3002	0	1D
149	Y	1801	1	1D	2D
156	#	4	2049	0	
162	L	5			
166	CL	6			
170	F	6			
174	Y	1804	3000	1	2
181	Y	1800	1	0	0
188	Y	1800	2	1	0
195	L	6			
199	Y	1821	3001	5	1D
206	Y	1827	3002	3001D	3000D
213	Y	1822	3002	6	1D
220	Y	1801	1	1D	2D
227	#	6	2049	0	
233	.				



## CAPTAÇO SINAL RESPOSTA

1	L	1			
5	CL	1			
9	L	2			
13	CL	0			
17	RA				
20	*	0			
24	H1	0			
28	F	0			
32	*-	0			
36	A+	1			
40	X>	1			
44	#	2	50	0	
50	:	1	50		
55	L	3			
59	CL	0			
63	F	0			
67	Y	1804	3000	1	2
74	Y	1800	1	0	0
81	Y	1800	2	1	0
88	L	4			
92	Y	1821	3001	1	1D
99	Y	1827	3002	3001D	3000D
106	Y	1822	3002	0	1D
113	Y	1801	1	1D	2D
120	#	4	2049	0	
126	.				

**PROGRAMA EM LINGUAGEM BASIC**

---

**PARA CÁLCULO DE IRIS**

---

```
10 LPRINT, "CALCULO DE IRIS"
20 LPRINT
30 LPRINT
40 LPRINT
50 LPRINT
60 LPRINT
70 LPRINT
80 LPRINT
90 LPRINT
100 INPUT "LOCAL DE TESTE = "; O$
110 INPUT "DATA = "; P$
120 Q=0
130 FOR Y=1 TO 4
140 INPUT "BANDA DE OITAVA = "; K
150 IF K=250 THEN E=.155:N=4
160 IF K=500 THEN E=.2:N=4
170 IF K=1000 THEN E=.2:N=4
180 IF K=2000 THEN E=.224:N=3
190 INPUT "AMPLITUDE DO DC = "; D
200 J=0
210 LPRINT
220 LPRINT
230 FOR I=1 TO N
240 LPRINT "MODULO = ";
250 INPUT C
260 LPRINT C
270 F=C/D
280 G=F/E
290 IF G<1 THEN 310
300 G=.99
310 X=(G/(1-G))
320 S=.4342944819#
330 H=10*(S*LOG(X))
340 IF H<-15 THEN H=-15
350 IF H>15 THEN H=15
360 J=J+H
370 NEXT I
380 L=J/N
390 M=(L+15)/30
```

```
400 LPRINT 'Valor Medio do Indice para,'
410 LPRINT '                                BANDA (";K") =';
420 LPRINT USING '8.####';M
430 Q=Q+J
440 LPRINT
450 NEXT Y
460 Z=(R+15)/30
470 LPRINT
480 LPRINT
490 LPRINT
500 LPRINT
510 LPRINT
520 LPRINT
530 LPRINT 'IRIS (";O$") =';
540 LPRINT USING '8.##';Z
550 LPRINT 'Data = ';P$
560 END
```

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

- [1] HOUTGAST, T. & STEENEKEN, H.J.M. The modulation transfer function in room acoustics as a predictor of speech intelligibility. Acustica, 28: 66-73, 1973.
- [2] AMERICAN NATIONAL STANDARD INSTITUTE. Methods for calculation of the articulation index. ANSI S3.5 - 1969.
- [3] KRYTER, K.D. Methods for the calculation and use of the articulation index. Journal of Acoustical Society of America, 34(11): 1689 - 97, November 1962.
- [4] TECHNICAL REVIEW TO ADVANCE TECHNIQUES IN ACOUSTICAL, ELETRICAL AND MECHANICAL MEASUREMENT. RASTI, Brüel & Kjaer, Denmark, 3: 45p., 1985.
- [5] HOUTGAST, T. & STEENEKEN, H.J.M. A review of the MTF concept in room acoustics and its use for estimating speech intelligibility in auditoria. Journal of Acoustical Society of America, 77 (3): 1069-77, March 1985.

- [6] STEENEKEN, H.J.M & HOUTGAST, T. A physical method for measuring speech - transmission quality. Journal of Acoustical Society of America, 67 (1): 318 - 26, January 1980.
- [7] HOUTGAST, T. & STEENEKEN, H.J.M. Predicting speech intelligibility in rooms from the modulation transfer function. 1. General rooms acoustics. Acustica, 46: 60-72, 1980.
- [8] VAN RIETSCHOTE, H.F. & HOUTGAST, T. Predicting speech intelligibility in rooms from the modulation transfer function. V: The merits of the ray - tracing model versus general room acoustics. Acustica, 53: 72-78, 1983.
- [9] HOUTGAST, T. & STEENEKEN, H.J.M. A multi-language evaluation on the RASTI - method for estimating speech intelligibility in auditoria. Acustica, 54 (4): 185 - 99, 1984.
- [10] INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. Report on the RASTI - method for the objective rating of speech intelligibility in auditoria, 14p., May 1983.
- [11] PRODUCT DATA. Speech transmission meter. Type 3361, Brüel & Kjaer, Denmark, 8p.

- [12] BRÜEL, P.V. Practical measurements with RASTI equipment.  
In: INTERNATIONAL CONGRESS ON ACOUSTICS, 12<sup>e</sup>,  
Toronto, 1986.
- [13] STEENEKEN, H.J.M & HOUTGAST, T. Some applications of the  
speech transmission index (STI) in auditoria.  
Acustica, 51: 229-34, 1982.
- [14] CAMPANELLA, A.J. Getting the message through. Sound and  
Video Contractor, 6 (1): 32-48, January 1988.
- [15] STEENEKEN, H.J.M & HOUTGAST, T. The temporal envelope  
spectrum of speech and its significance in room  
acoustics. In: INTERNATIONAL CONGRESS ON ACOUSTICS,  
11<sup>e</sup>, Paris, 1983.
- [16] KINSLER, L.E. Fundamentals of acoustics. John Wiley & Sons,  
Inc, 3<sup>e</sup> ed., 1982.
- [17] AMERICAN NATIONAL STANDARD INSTITUTE. American National  
Standard Specification for octave, half-octave, and  
third-octave band filters sets: ANSI S1.11 - 1966  
(R 1976).
- [19] REYNA, A.N e SANCHO, J. Technical Note: The influence of  
room shape on speech intelligibility in rooms with  
varying ambient noise levels. Noise Control  
Engineering Journal, 31 (3): 173-77, Nov - Dec/ 1988.